

Aleksi Marttinen

## **Satelliittimaa-aseman paikanvalinta**

**Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 1.11.2010.

**Työn valvoja:**

Prof. Riku Jäntti

**Työn ohjaaja:**

DI Mika Nupponen



**Aalto-yliopisto**  
Teknillinen korkeakoulu

Tekijä: Aleksi Marttinen

Työn nimi: Satelliittimaa-aseman paikanvalinta

Päivämäärä: 1.11.2010

Kieli: Suomi

Sivumäärä:10+71

Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Tietoverkko- ja tietoliikennetekniikan osasto

Professuuri: Tietoliikennetekniikka

Koodi: S-72

Valvoja: Prof. Riku Jäntti

Ohjaaja: DI Mika Nupponen

Satelliittitietoliikenteen kysyntä on kasvanut viime vuosina huomattavasti. Suomen maantieteellinen asema satelliittitietoliikenteelle on haastava, sillä täältä geostationäärisellä kiertoradalla olevat satelliitit näkyvät pienillä korotuskulmilla. Pienillä korotuskulmilla tietoliikennesignaali joutuu kulkemaan pitkän matkan maan ilmakehässä, jossa se on alttiina ilmakehän ilmiöille, jotka saattavat vaimentaa signaalia huomattavasti. Tärkeimmät signaalia vaimentavat ilmiöt ovat vapaan tilan vaimennus, sadevaimennus sekä ilmakehän kaasujen aiheuttamat vaimennukset.

Tässä työssä on perehdytty satelliittimaa-aseman paikanvalintaan Suomen aluerajojen sisällä. Tehdyt linkkibudjettilaskelmat perustuvat Kansainvälisen Televisiointiliiton (ITU) suosituksiin. ITU tarjoaa myös ilmastollista tilastotietoa eri puolilta maapalloa, jota on käytetty hyväksi tehdyissä laskuissa. Työn yhteydessä tehtiin työkalu, jonka avulla voidaan vertailla eri sijoituspaikkojen soveltuvuutta satelliittimaa-aseman paikaksi.

Työn empiirisessä osuudessa vertailtiin Helsingin, Vaasan, Joensuun sekä Rovaniemen soveltuvuutta satelliittimaa-aseman paikaksi. Vertailu tehtiin C-, Ku- sekä Ka-kaistalla. Tulokset osoittavat, että satelliittimaa-aseman sijoitus Helsinkiin olisi näistä neljästä sijoituspaikkavaihtoehdosta sopivin valinta. Muutkin sijoituspaikkakuntavaihtoehdot soveltuvat maa-aseman sijoituspaikoiksi. Niissä voidaan kompensoida ilmakehän aiheuttamia häviöitä suuremmalla antennilla.

Avainsanat: Maa-asema, Linkkibudjetti, Satelliittitietoliikenne

Author: Aleksi Marttinen

Title: Location Selection of the Satellite Earth-stations

Date: 1.11.2010

Language: Finnish

Number of pages:10+71

Faculty of Electronics, Communications and Automation

Department of Communications and Networking

Professorship: Communications Engineering

Code: S-72

Supervisor: Prof. Riku Jäntti

Instructor: M.Sc. (Tech.) Mika Nupponen

The demand for the satellite communication systems has recently grown significantly. The geographical location of Finland is challenging for satellite communication, because from Finland the satellites on the geostationary orbit can be seen only on low elevation angles. On the low elevation angles a signal has to go a long way in the atmosphere of the earth susceptible to the atmospheric attenuation. The most important attenuating phenomena are free space loss, attenuation due to rain and attenuation due to atmospheric gases.

In this work the selection of the location of the satellite earth-station in Finland has been inspected. The link budget calculations are based on the recommendations of the International Telecommunication Union (ITU). ITU also offers atmospheric statistics of the weather conditions from all over the world. This statistical data is also used in the calculations. A Microsoft excel tool which can be used to compare the suitability of different places as the location of the satellite earth station was developed during the research.

In the empirical section of the work the suitability of Helsinki, Vaasa, Joensuu and Rovaniemi as the location of the satellite earth-station was compared. The comparison was made at the C-, Ku-, and Ka-bands. The results show that from these alternatives Helsinki would be the most suitable location for the earth-station. Still, it is possible to place the earth-station also to the other three locations. In these places larger antennas can be used to compensate the atmospheric losses.

Keywords: Earth-station, Link budget analysis, Satellite communication

## Esipuhe

Haluan kiittää työn valvojaa professori Riku Jänttiä opastuksesta, kommenteista sekä hienosta mahdollisuudesta tehdä diplomityö Aalto Yliopiston Tietoliikenne- ja tietoverkkotekniikan laitoksella.

Suuret kiitokset kuuluvat myös työn ohjaajalle DI Mika Nupposelle avusta ja tuesta, jotka olivat ensiarvoisen tärkeitä työn valmistumisessa, sekä hyvästä yhteistyöstä.

Myös Jouko Vankka, Vesa Roiha, Sakari Seppänen, Lasse Miettunen sekä Juha Leppänen ansaitsevat kiitokset ohjauksesta sekä erinomaisista kommenteista työhöni liittyen.

Kiitän myös TkT Markku Liinaharjaa sekä avaruustekniikan assistenttia Jaan Praksia asiantuntevista kommenteista. Myös Aalto yliopiston Tietoliikenne- ja tietoverkkotekniikan laitoksen mukava ja innostava työskentelyilmapiiri ansaitsee maininnan.

Lisäksi haluan kiittää vanhempiani, jotka ovat tukeneet minua opiskeluvuosiени ajan.

Otaniemi, 18.10.2010

Aleksi Marttinen

# Sisältö

<b>Tiivistelmä</b>	<b>ii</b>
<b>Tiivistelmä (englanniksi)</b>	<b>iii</b>
<b>Esipuhe</b>	<b>iv</b>
<b>Sisällysluettelo</b>	<b>v</b>
<b>Kuvat</b>	<b>vii</b>
<b>Lyhenteet</b>	<b>viii</b>
<b>Symbolit</b>	<b>ix</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>1</b>
1.1 Työn aiheen rajausta . . . . .	2
1.2 Työn sisältö . . . . .	2
<b>2 Satelliittitietoliikenne</b>	<b>3</b>
2.1 Satelliittitietoliikenteen historia . . . . .	3
2.2 Kiertoradat ja geometria . . . . .	4
2.3 Satelliittitietoliikenteen säännökset ja standardit . . . . .	8
2.4 Taajuuskaistat . . . . .	10
2.5 Maa-asemat . . . . .	12
2.6 Tietoliikennesatelliitit . . . . .	14
2.7 Satelliittitietoliikenneverkot . . . . .	19
2.7.1 Fyysinen kerros . . . . .	19
2.7.2 Siirtoyhteyshierarkia . . . . .	20
2.7.3 Kuljetushierarkia . . . . .	21
2.8 Kaupalliset Satelliittioperaattorit . . . . .	22
2.9 Yhteenveto . . . . .	24
<b>3 Satelliittilinkit</b>	<b>26</b>
3.1 Signaalin eteneminen . . . . .	26
3.1.1 Radiosäteiden kaartuminen . . . . .	26
3.1.2 Vapaan tilan vaimennus . . . . .	26
3.1.3 Sadevaimennus . . . . .	26
3.1.4 Ilmakehän kaasusta aiheutuva vaimennus . . . . .	30
3.1.5 Pilvet ja sumu . . . . .	33
3.1.6 Troposfäärin skintillaatio . . . . .	34
3.1.7 Ionosfäärin ilmiöt . . . . .	36
3.1.8 Sulamiskierros . . . . .	39
3.1.9 Antennin suuntaamishäviöt . . . . .	40
3.1.10 Kokonaisvaimennuksen laskeminen . . . . .	40
3.2 Kohina ja interferenssi . . . . .	40

3.3	Linkkibudjetti . . . . .	44
3.4	Yhteenveto . . . . .	46
<b>4</b>	<b>Maa-aseman paikanvalinnan vaikutus yhteyden laatuun</b>	<b>47</b>
4.1	Maa-aseman paikanvalinnan kriteereitä . . . . .	47
4.2	SELC-työkalu . . . . .	48
4.2.1	Ohjelmalle annettavat lähtöarvot . . . . .	48
4.2.2	ITU:n tilastot . . . . .	49
4.2.3	Vaimennukset . . . . .	52
4.2.4	Kantoaalto-kohinasuhde sekä bittienergia-kohinasuhde . . . . .	53
4.2.5	Ohjelman antamat tulokset . . . . .	53
4.3	Yhteenveto . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Tulokset</b>	<b>55</b>
5.1	Vertailtavat paikkakunnat ja niiden erityisominaisuudet . . . . .	55
5.2	C-Kaista . . . . .	56
5.3	Ku-Kaista . . . . .	57
5.4	Ka-Kaista . . . . .	60
5.5	Laskelmien ja tehtyjen mittausten yhteensopivuus . . . . .	64
5.6	Yhteenveto . . . . .	65
<b>6</b>	<b>Johtopäätökset</b>	<b>67</b>
	<b>Viitteet</b>	<b>69</b>

# Kuvat

1	Keplerin toinen laki . . . . .	6
2	10°elevaatiokulman rajat . . . . .	9
3	ITU:n palvelualueet . . . . .	10
4	Maa-aseman lohkokaavio . . . . .	13
5	Cassagrain-antennin toiminta . . . . .	14
6	Seuranta-, telemetria-, hallinta- ja monitorointijärjestelmä . . . . .	17
7	Satelliitin taajuuden muunnos lähetin-vastaanottimen lohkokaavio . . . . .	18
8	Satelliitin prosessoivan lähetin-vastaanottimen lohkokaavio . . . . .	19
9	Intelsatin hallinnassa olevat satelliitit . . . . .	23
10	Eutelsatin hallinnassa olevat satelliitit . . . . .	24
11	SES:n hallinnassa olevat satelliitit . . . . .	24
12	Sateen kaaviokuva . . . . .	28
13	Kaasujen aiheuttama vaimennus taajuuden funktiona . . . . .	32
14	Pilvien aiheuttama vaimennus taajuuden funktiona . . . . .	35
15	Ionosfäärin aiheuttama huipusta-huippuun heilahtelu . . . . .	37
16	Faraday kiertäminen taajuuden funktiona . . . . .	38
17	Ryhmäviive taajuuden funktiona . . . . .	39
18	Kohinalähteitä taajuuden funktiona . . . . .	42
19	Ilmakehän kohinalämpötila kirkkaan sään olosuhteissa . . . . .	43
20	Tyypillinen satelliittilinkki . . . . .	45
21	SELC-ohjelma . . . . .	48
22	Työkalulle annettavia lähtöarvoja . . . . .	50
23	Ohjelman antamia tuloksia . . . . .	53
24	Vertailtavat kaupungit . . . . .	55
25	Atlantic Bird 3:n palvelualue . . . . .	56
26	Nousevan siirtosuunnan kokonaisvaimennus C-kaistalla . . . . .	58
27	Laskevan siirtosuunnan Kantoaaltokohinasuhde C-kaistalla . . . . .	58
28	Eutelsat W3A-satelliitin Europe B-keilan palvelualue . . . . .	59
29	Laskevan siirtosuunnan kokonaisvaimennus Ku-kaistalla . . . . .	60
30	Laskevan siirtosuunnan Kantoaalto-kohinasuhde Ku-kaistalla . . . . .	60
31	Sateen aiheuttama vaimennus Ku-Kaistalla . . . . .	61
32	Astra 1L-satelliitin Europe-keilan palvelualue . . . . .	61
33	Laskevan siirtosuunnan kokonaisvaimennus Ka-kaistalla . . . . .	62
34	Laskevan siirtosuunnan Kantoaalto-kohinasuhde Ka-kaistalla . . . . .	63
35	Sateen aiheuttama vaimennus Ka-Kaistalla . . . . .	63
36	Satelliittiyhteyden mittausten ja laskelmien yhteensopivuus . . . . .	64
37	Radiometrimittauksien ja laskelmien yhteensopivuus . . . . .	64
38	Ilmakehänvaimennusten vuosittainen vaihtelu 1979-1989 . . . . .	65

## Lyhenteet

ARQ	Automatic Repeat-reQuest, uudelleenlähetysmenetelmä
BER	Bit error ratio, bittivirhesuhde
BSS	Broadcasting Services, satelliittitelevisiopalvelut
CDMA	Code division multiple access, koodijakokanavointi
CNES	Centre National d'Études Spatiales, Ranskan avaruusjärjestö
DL	Downlink, laskeva siirtosuunta
FEC	Forward error correction, virheenkorjaus
FSS	Fixed Satellite Services, kiinteät satelliittipalvelut
GEO	Geostationary earth orbit, geostationäärinen rata
GSO	Geosynchronous earth orbit, geosynkroninen rata
HPA	High Power Amplifier, tehovahvistin
IF	Intermediate frequency, välitaajuus
ITU	International Telecommunication Union, kansainvälinen televiestintäliitto
ITU-R	ITU:n radioviestintäsektori
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Euroopan keskipitkien sääennusteiden keskus
EIRP	Equivalent isotropically radiated power, lähetysteho
FDMA	Frequency division multiple access, taajuusjakokanavointi
LEO	Low earth orbit, matalakiertorata
LNA	Low-noise amplifier, pienikohinainen vahvistin
LNB	Low-noise block converter, pienikohinainen taajuusmuunnin
MAC	Media Access Control, pääsyohjaus
MEO	Medium Earth orbit, korkea kiertorata
MSS	Mobile Satellite Services, Mobiilit satelliittipalvelut
RF	Radio frequency, radiotaajuus
RTT	Round Trip Time, kiertoviive
SCPS	Space Communications Protocol Standards, kiihdytysmenetelmä
TCP	Transmission Control Protocol, tiedonsiirron halinta protokolla
TEC	Total Electron Content, elektronien kokonaislukumäärä
TDMA	Time division multiple access, aikajakokanavointi
TTC&M	Tracking, Telemetry, Command and Monitoring, seuranta-, telemetria-, hallinta- ja monitorointijärjestelmä
UL	Uplink, nouseva siirtosuunta
UPS	Uninterruptible Power Supply, lyhyiden sähkökatkojen ajaksi virransyötön takaava laite
QoS	Quality of service, yhteydenlaatu
XTP	Xpress Transport Protocol, kiihdytysmenetelmä



## Symbolit

$a$	Kappaleiden välinen keskimääräinen etäisyys
$A_{0.01}$	Sateen aiheuttama vaimennus, joka ylittyy 0.01 % ajasta
$A_K$	Kaasujen aiheuttama vaimennus
$A_O$	Kuivan ilman aiheuttama vaimennus
$A_{Pilvet}$	Pilvien aiheuttama vaimennus
$A_{Sade}$	Sateen aiheuttama vaimennus
$A_{Skin}$	Skintillaation vaimennus
$A_{TOT}$	Kokonaisvaimennus
$A_v$	Vapaan tilan vaimennus
$B$	Maa-aseman ja satelliitin pituuspiirien erotus
$b$	Kaistanleveys
$B_{av}$	Keksimääräinen magneettikentän voimakkuus
$\frac{C}{N_0}$	Kantoaalto-kohinasuhde
$D$	Antennin halkaisija
$d$	Satelliitin ja maa-aseman välinen etäisyys
$D_{eff}$	Antennin tehokas halkaisija
$\frac{E_b}{N_o}$	Bittienergia-kohinasuhde
$e_e$	Maapallon eksentrisyys
$EIRP$	Lähettimen lähetysteho
$F_{in}, F_{out}$	Voima
$F_a$	Kohinakerroin
$f$	Taajuus
$f_p$ ja $f_s$	Relaksaatiotaajuus
$G/T$	Vastaanottimen hyvyysluku
$G_t$	Lähetysantennin vahvistus
$G_r$	Vastaanottimen antennin vahvistus
$h_0$	0 °C:n isoterminen korkeus
$h_{GSO}$	Geosynkroonisen radan etäisyys maanpinnasta
$h_k$	Kuivan ilman korkeus
$h_L$	Pyörteisen kerroksen korkeus
$h_R$	Sadekorkeus
$h_s$	Maa-aseman antennin korkeus merenpinnasta
$I$	Signaaliampplitudi
$k$	Boltzmannin vakio
$K_l$	Pilvien ominaisvaimennus
$L$	Nesteen määrä pilvessä
$L_{earth}$	Maa-aseman leveyspiiri asteina

$L_E$	Signaalin siirtotien tehokas pituus
$L_g$	Signaalin kulkeman matkan horisontaalinen projektio
$L_{sat}$	Satelliitin leveyspiiri
$L_s$	Signaalin kulkema matka
$m$	Maapallon massa
$n_e$	Elektronien tiheys kuutimetrissä
$N_T$	Elektronien kokonaislikumäärä
$N_{wet}$	Radiosignaalin taittumista kuvaava termi
$P$	Todennäköisyys
$p$	Ilmanpaine
$p_a$	Kohinateho antennissa
$P_{p-p}$	Signaalin huipusta huippuun vaihtelun arvo
$P_t$	Lähetysteho
$r$	Kiertoradan säde
$R_{0.01}$	Sadeintensiteetti, joka ylittyy 0.01 % ajasta
$r_{0.01}$	Sateen horisontaalinen pelkistyskerroin
$R_b$	Tiedonsiirtonopeus
$S_4$	Skintillaatioindeksi
$T$	Kiertoaika
$t$	Lämpötila
$t_0$	Ympäristön referenssilämpötila
$t_b$	Kohinalämpötila
$t_d$	Etenemisviive
$T_{Kirkas\ Taivas}$	Kirkkaan taivaan kohinalämpötila
$t_m$	Ympäristön lämpötila
$v$	Kappaleen nopeus kiertoradalla
$V_t$	Integroitu vesimäärä
$\gamma_o$	Kuivan ilman ominaisvaimennus
$\gamma_R$	Sateen ominaisvaimennus
$\gamma_w$	Vesihöyryn ominaisvaimennus
$\epsilon$	Veden dielektrinen permittiivisyys
$\eta$	Antennin hyötysuhde
$\theta$	Elevaatiokulma
$\theta_F$	Faraday kiertymä
$\lambda$	Aallonpituus
$\mu$	Keplerin vakio
$\nu_{0.01}$	Vertikaalinen säätökerroin
$\rho$	Vesihöyryn tiheys
$\sigma$	Signaalin standardipoikkeama etenemistiellä
$\tau$	Optinen syvyys
$ \Phi_t $	Dispersio
$\psi$	Atsimuuttikulma

# 1 Johdanto

Viime vuosina on tietoliikennesatelliittijärjestelmien kysyntä kasvanut huomattavasti. Satelliittitietoliikenteen etu on suuri saavutettava käytettävyyssalve, minkä ansiosta tietoliikenneyhteys pitkienkin matkojen päästä muusta tietoliikenneinfrastruktuurista on mahdollinen. Satelliittitietoliikenneverkkoon on myös vaivatonta liittää uusia käyttäjiä toisin kuin asutuskeskusten ulkopuolisissa maanpäällisissä verkoissa. Kolmas satelliittitietoliikenteen etu on se, että se on immuuni maanpäällisille katastrofeille kuten esimerkiksi maanjäristyksille. Satelliittitietoliikenteen huono puoli on korkeat aloituskustannukset, joita syntyy muun muassa satelliitin suunnittelusta sekä sen lähettämisestä maata kiertävälle radalle. On kuitenkin olemassa tietoliikenneoperaattoreita, jotka tarjoavat asiakkailleen mahdollisuuden käyttää satelliitteja tietoliikenneyhteyksiin. Näin siis pienemilläkin toimijoilla on mahdollisuus päästä käyttämään satelliittilinkkejä ilman huolta satelliitin suunnittelusta, huollosta ja ylläpidosta.

Satelliittitietoliikenteen kasvun vuoksi matalammat taajuuskaistat, joilla ilmakehän aiheuttamat ongelmat eivät ole merkittäviä, ovat täyttymässä. Satelliittitietoliikenteen on siis siirryttävä kapasiteetin kasvun lisäämiseksi käyttämään entistä korkeampia taajuuskaistoja. Korkeammilla taajuuskaistoilla ilmakehän ilmiöt ovat erittäin merkittäviä signaalia heikentäviä tekijöitä, jotka on otettava huomioon satelliittiyhteyttä suunniteltaessa. Merkittävimmät etenemishäviöt ovat sadevaimennus, vapaantilan vaimennus sekä ilmakehän kaasusta johtuva vaimennus. Myös antennin suuntaamisvaimennukset saattavat olla merkittäviä satelliittiyhteydessä. Vaimennusten tarkka tunteminen on tärkeää, sillä se saattaa vaikuttaa merkittävästi satelliittilinkin suorituskykyyn. Pahimmassa tapauksessa huonosti suunnitellussa yhteydessä saattaa esiintyä pitkiäkin katkoajia tai yhteydellä saavutetaan ainoastaan erittäin matalia tiedonsiirtonopeuksia. Taajuuden lisäksi satelliittitietoliikenneyhteyden signaalin vaimennukseen vaikuttaa muun muassa maa-aseman paikka sekä ilmasto ja satelliitin korotuskulma. Satelliittiyhteyden signaalin etenemishäviöt kasvavat taajuuden kasvaessa ja korotuskulman pienentyessä. Esimerkiksi sadevaimennus on merkityksellistä erityisesti yli 10 GHz:n taajuuksilla. Etenemishäviöiden satunnaisesti luonteesta johtuen etenemishäviöiden vaikutusta satelliittiyhteyteen tutkitaan tavallisesti todennäköisyyden funktiona.

Suomen paikka on satelliittitietoliikenteen kannalta haastava. Täältä geosynkronisella radalla olevat satelliitit näkyvät ainoastaan matalilla korotuskulmalla. Matalan korotuskulman vuoksi signaali kulkee pitkän matkan maapallon ilmakehässä ja on näin pidempään alttiina ilmakehän vaimennukselle kuin signaali korkeammilla korotuskulmilla. Matalilla korotuskulmilla myös kohina ja interferenssi saattavat häiritä merkittävästi satelliittiyhteyttä. Vaimennusten, kohinan ja interferenssin lisäksi myös ionosfäärin ilmiöiden sekä sateen aiheuttaman polarisaation muutoksen vaikutusta satelliittiyhteyteen on syytä pohtia. Ionosfäärin ilmiöt on syytä ottaa huomioon erityisesti alle 3 GHz:n satelliittiyhteyksillä.

Usein satelliittitietoliikenteen suunnittelussa pyritään pitämään korotuskulmat yli 10 asteen suuruisina. Alle 10 asteen kulmilla tulee ottaa huomioon säteen kaartuminen maata kohti, mikä luonnollisesti lisäisi entisestään signaalin ilmakehässä kul-

kemaa matkaa. Suomen etelärannikolla yli 10 asteen korotuskulmalla näkyy selvästi suurempi osa geosynkroonista rataa kuin pohjoisimmasta Suomesta. Esimerkiksi Helsingistä näkyy geosynkrooninen rata 24 asteesta läntistä pituutta 75 asteeseen itäistä pituutta. Rovaniemeltä sen sijaan näkyy geosynkrooninen rata 10 asteesta läntistä pituutta 62 asteeseen itäistä pituutta.

## 1.1 Työn aiheen raja

Tässä työssä pohditaan satelliittimaa-aseman paikanvalinnan teknisiä ja maantieteellisiä perusteita. Työn yhteydessä tehtiin Microsoft Excelillä työkalu, jolla voidaan vertailla eri paikkakuntien soveltuvuutta satelliittimaa-aseman paikalle. Työkalun tekemät laskelmat perustuvat Yhdistyneiden Kansakuntien alaisen Kansainvälisen Televiestintäliiton (ITU, International Telecommunication Union) antamiin suosituksiin signaalin etenemisestä. Kansainvälinen televiestintäliitto tarjoaa ilmastollista tilastotietoa eri puolilta maapalloa, jonka avulla voidaan ottaa huomioon myös paikkakuntien ilmastolliset erityispiirteet. Työssä keskitytään C-, Ku- ja Ka-kaistoille eli taajuuksille 4 - 40 GHz. Näillä taajuusalueilla satelliittipalvelut ovat tyypillisesti laajakaistapalveluita.

Pyrkimällä mahdollisimman suureen korotuskulmaan saadaan minimoitua signaalin ilmakehässä kulkema matka. On kuitenkin mielenkiintoista tutkia onko Suomen alueella saavutettavissa merkittävää hyötyä maa-aseman sijoituksessa tai voiko päätös satelliittimaa-aseman paikasta tehdä teknisistä perusteista piittaamatta. Työssä keskitytään kiinteisiin satelliittitietoliikennelinkkeihin.

## 1.2 Työn sisältö

Luvussa 2 esitellään perustietoa satelliittitietoliikenteestä. Ensin esitellään lyhyesti langattoman tietoliikenteen historiaa sekä satelliittitietoliikenteen perustermistöä. Luvussa esitellään myös elevaatio- ja atsimuuttikulmien käsitteet, ITU:n toimintaa sekä maa-asemien ja satelliittien toimintaa.

Perustietoa satelliittilinkkien mitoituksista esitellään luvussa 3. Luvussa esitellään ITU:n suositusten mukaiset laskut ilmakehän vaimennuksille. Myös kohinan ja interferenssin vaikutusta satelliittilinkkiin pohditaan sekä esitellään radiolinkin mitoitukseen käytettäviä linkkibudjettimenetelmä.

Työn yhteydessä tehtiin Microsoft Excelillä SELC-työkalu, jonka avulla voidaan tutkia eri paikkakuntien soveltuvuutta maa-aseman sijoituspaikaksi. Sovellus käyttää ITU:n suositusten mukaisia malleja satelliittilinkin mitoitukseen. Tämä työkalu sekä muita maa-aseman paikanvalinnan kriteereitä esitellään luvussa 4.

SELC-työkalulla tutkittiin onko paikkakunnilla Helsinki, Vaasa, Joensuu tai Rovaniemi eroja sopivuudessa satelliittimaa-aseman paikaksi. Laskelmat tehtiin C-, Ku- sekä Ka-kaistalle eri satelliiteilla. Oletuksena oli, että maa-asemassa oleva laitteisto olisi kullekin paikkakunnalle samat, joten erot paikkakuntien välille tulivat ainoastaan paikkakuntien ilmastollisista ja maantieteellisistä ominaisuuksista. Laskelmien tulokset esitellään luvussa 5. Luvussa myös tutkitaan miten SELC-työkalun tulokset vastaavat käytännön satelliittimittausten tuloksia.

## 2 Satelliittitietoliikenne

Satelliittitietoliikenne eroaa tietyin osin maanpäällisestä radioliikenteestä. Muun muassa pitkät etenemisviivet tuottavat haasteita kommunikoitaessa satelliittien avulla. Tässä luvussa esitellään perustietoa satelliittitietoliikenteestä, jota on syytä tuntea ymmärtääkseen satelliittitietoliikenteen erityispiirteitä.

Tässä luvussa perehdytään ensin lyhyesti sekä langattoman tietoliikenteen että satelliittitietoliikenteen historiaan kappaleessa 2.1. Kappaleessa 2.2 esitellään kiertoratoja, joilla satelliitit kiertävät maapalloa sekä maa-aseman antennin suuntaamisessa tärkeät elevaatio- ja atsimuuttikulmat. Taajuuskaistat ja niiden pääasialliset käyttötarkoitukset tullaan esittelemään kappaleessa 2.4. Tämän jälkeen perehdytään lyhyesti satelliittimaa-asemiin kappaleessa 2.5 sekä satelliitteihin kappaleessa 2.6. Luvussa esitellään myös lyhyesti satelliittitietoverkkojen käyttämiä menetelmiä kappaleessa 2.7 sekä muutamia kaupallisia satelliittioperaattoreita kappaleessa 2.8.

### 2.1 Satelliittitietoliikenteen historia

Langattoman tietoliikenteen perusteet esitti skotlantilainen James Clerk Maxwell (1831-1879) artikkelissaan "A dynamical theory of the electromagnetic field" vuonna 1864. Teoksessaan Maxwell esitteli sähköopin matemaattisen perustan, jonka mukaan sähkömagneettinen säteily koostuu valonnopeudella etenevistä värähtelevistä sähkö- ja magneettikentistä. [1] Maxwell yhdisti työssään Gaussin lain sähkö- ja magneettikentille, Amperèn lain magneettikentille ja Faraday-Henryn lain elektromagneettiselle induktiolle sekä lisäsi siirrosvirtatermin Amperèn lakiin. Artikkelissa ei kuitenkaan esiintynyt neljää kuuluisaa Maxwellin yhtälöä vaan teorian kuvaamiseen tarvittiin 20 yhtälöä. Maxwell nimittäin käytti yhtälöistä vaivalloista komponenttimuotoa. Myöhemmin sama yhtälöjoukko esiintyi myös vuonna 1873 julkaistussa Maxwellin pääteoksessa "Treatise on Electricity and Magnetism". Maxwellin teos oli kuitenkin melko vaikeatajuinen tuon ajan fyysikoille eikä saanut kovin innostunutta vastaanottoa. Itseoppinut fyysikko Oliver Heaviside (1850-1925) kuitenkin ymmärsi teoksen merkityksen ja jatkoi Maxwellin ideoiden jatkokehittelyä. Myöhemmin juuri Heaviside julkaisi kuuluisat Maxwellin yhtälöt nykyaikaisessa vektorimuodossa. Näitä yhtälöitä voidaan perustellusti pitää kaiken sähkömagnetismin perustana ja Maxwellia yhtenä 1800-luvun tärkeimmistä tutkijoista.

Ensimmäisenä Maxwellin yhtälöt todisti kokeellisesti paikkaansapitäviksi saksalainen fyysikko Heinrich Hertz (1857-1894) vuonna 1888. Hertz ei kuitenkaan uskonut sähkömagneettisten aaltojen käyttöön tietoliikenteessä, sillä moduloinnin ajatus oli hänelle vieras. Hertzin lisäksi sähkömagneettisia aaltoja tutki myös Oliver Lodge (1851-1940), jonka vuonna 1894 tekemää koetta pidetään usein ensimmäisenä sähkömagneettisen lennättimen demonstraationa. Kokeessa Lodge onnistui siirtämään lennätinsignaalin yli 60 metrin etäisyydelle seinien läpi luentosalista toiseen. Myös venäläinen Alexander Popov oli kehittämässä radiota. Vuonna 1895 hän esitteli vastaanottimen, jota hän käytti salaman iskujen rekisteröimiseen. Hän keksi käyttää laitetta langattomana vastaanottimena ja vuoden 1896 maaliskuussa lähetin oli valmis. Popov onnistui kokeissaan vastaanottamaan sanoman 250 metrin etäisyydeltä

lähettimestä.

Italialainen Guglielmo Marconi oli kolmas radiota kehittämässä olleista tiedemiehistä. Marconi käytti antennina kokeissaan Hertzin aiemmin kehittämää vertikaalista Hertzin dipolia, jonka hän jatkokehitti säteileväksi monopoliksi. Vuonna 1901 Marconin kehittämällä radiolla onnistuttiin lähettämään morse-aakkosten 's'-kirjain yli Atlantin valtameren Englannin Cornwallista Kanadan rannikolle Newfoundlandiin. Vaikka radion alkuvaiheessa sen kehityksestä vastasi monta henkilöä, ainoastaan Marconi palkittiin vuonna 1909 Nobelin fysiikan palkinnolla langattoman lähettimen kehityksestä. [2]

Edellisten onnistuttua radion kehityksessä alettiin herätellä ajatusta tietoliikennettä välittävistä satelliiteista. Erityisesti tieteiskirjailija Arthur C. Clarcken (1917-2008) vuonna 1945 satelliiteista kirjoittama artikkeli *Wireless World* lehdessä sai paljon huomiota. Kyseisen artikkeli ansiosta Clarkea pidetään usein tietoliikennesatelliitin idean keksijänä. Artikkelissaan Clarke esittää miehitettyjen satelliittien sijoittamista geostationääriselle radalle. Vuonna 1957 Neuvostoliitto lähetti ensimmäisen satelliitin Sputnik 1:n maata kiertävälle radalle. Sputnik 1 kiersi maan 1440 kertaa noin kolmessa kuukaudessa kunnes ilmakehän kitka pudotti sen tammikuussa 1958. Lentonsa ajan Sputnik 1 lähetti maahan piipitystä, joka sisälsi tiedon satelliitin lämpötilasta ja paineesta.

Ensimmäinen varsinainen tietoliikennesatelliitti oli Yhdysvaltalaisten Echo 1A, joka laukaistiin avaruuteen vuonna 1960. Se oli tehty mylar-kalvosta ja se puhallettiin avaruudessa 30 metrin läpimittaiseksi palloksi. Satelliitin pinta oli päällystetty radioaaltoja heijastavalla alumiinilla. Kyseessä oli passiivinen satelliitti, joka heijasti sitä kohti lähetetyt radiosäteet. Ensimmäinen aktiivinen satelliitti oli 10.7.1962 lähetetty Telstar. Se siis vastaanottimelle lähetyksen lisäksi myös vahvasti saapunutta signaalia. Ensimmäiset tietoliikennesatelliitit kiersivät maapalloa matalilla kiertoradoilla, jolloin niiden näkyvyysaika maa-asemalta oli lyhyt. Geostationäärisellä radalla maata kiertävät satelliitit pysyvät maasta katsottuna paikoillaan, joten sillä olevat satelliitit ovat aina samassa paikassa maa-asemalta katsottuna. Ensimmäinen geostationaarisen radan tietoliikennesatelliitti lähetettiin avaruuteen 19.8.1964. Satelliitin nimi oli Syncom 3 ja se välitti muun muassa kuvaa Tokion olympialaisista Tyynen valtameren yli. [1]

## 2.2 Kiertoradat ja geometria

### Keplerin lait

Lait taivaan kappaleiden liikkeille loi ensimmäisenä saksalainen tähtitieteilijä Johannes Kepler (1571-1630). Tyko Brahen assistenttina Keplerillä oli käytössään Brahen havaintoaineisto, joiden perustella hän loi empiiriset lait taivaankappaleiden liikkeille. Myöhemmin Keplerin lakeja vielä hiottiin hieman Newtonin gravitaatiolain perusteella. Nämä samat lait pätevät hyvin aurinkoa kiertävien planeettojen lisäksi myös maata kiertäviin satelliitteihin. Kiertoradalla olevaan satelliittiin kohdistuvat voimat ovat maan aiheuttama vetovoima, joka pyrkii vetämään satelliittia kohti maata, sekä satelliitin kiertonopeudesta johtuva voima, joka yrittää vetää satelliittia

maapallosta poispäin. Näiden voimien suuruudet voidaan laskea

$$F_{in} = m \left( \frac{\mu}{r^2} \right) \quad (2.1)$$

ja

$$F_{out} = m \left( \frac{v^2}{r} \right) \quad (2.2)$$

missä  $F_{in}$  on maan vetovoimasta johtuva voima,  $F_{out}$  maasta poispäin suuntautuva voima,  $m$  maapallon massa,  $v$  satelliitin nopeus kiertoradalla,  $r$  kiertoradan säde sekä  $\mu$  Keplerin vakio, jonka lukuarvo on  $3.986004 \cdot 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$

Keplerin ensimmäisen lain mukaan satelliitin kiertorata on ellipsi, jonka toisessa polttopisteessä on maapallo. Jollei satelliittiin vaikuta muita voimia, satelliitti tulee ennen pitkää sijoittumaan kiertämään maata elliptisellä radalla, jonka toisessa polttopisteessä on aurinko. Elliptisen radan koko riippuu satelliitin massasta ja kulmanopeudesta. Toisen Keplerin lain mukaan kahdella yhtä pitkällä aikavälillä satelliitin paikat ja elliptisen kiertoradan polttopiste peittävät täsmälleen yhtä suuren pinta-alan kiertoradan tasossa. Tätä lakia on havainnollistettu kuvassa 1. Kuvan tapauksessa auringon kiertolainen matkaa yhtä pitkässä ajassa A:sta B:hen sekä C:stä D:hen ja pinta-alat A-B-Aurinko sekä C-D-Aurinko ovat yhtä suuret.

Keplerin kolmas laki määrittää kiertokappaleen kiertoajan. Kolmannen lain mukaan kiertoaika voidaan laskea

$$T^2 = \left[ \frac{4\pi^2}{\mu} \right] a^3 \quad (2.3)$$

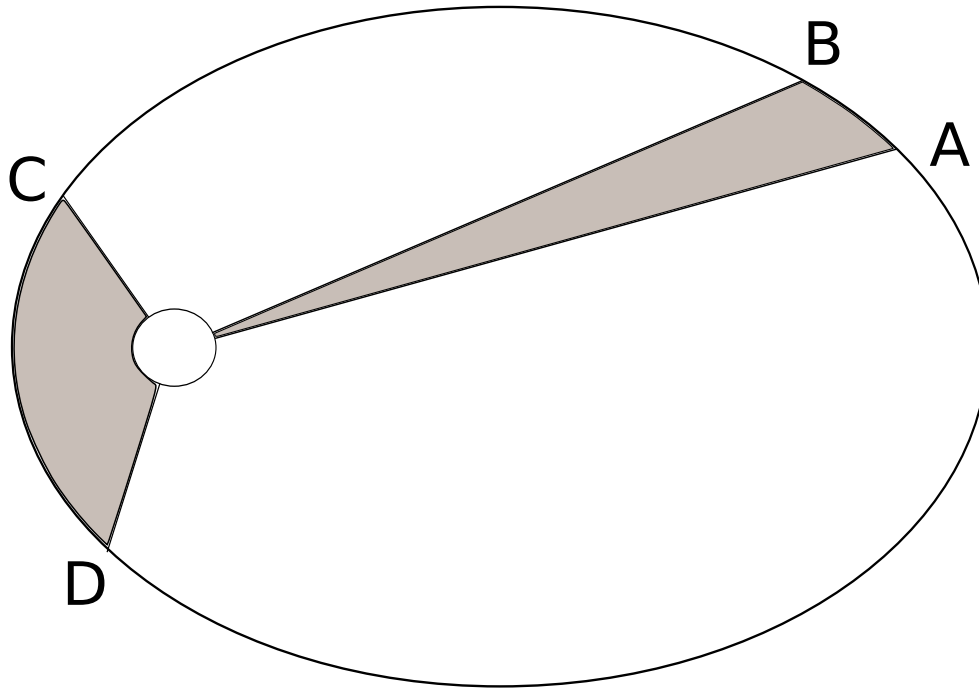
missä  $T$  on kiertoaika ja  $a$  kappaleiden, esimerkiksi maapallon ja kiertävän kappaleen, välinen keskimääräinen etäisyys kilometreissä. Mikäli kiertorata on pyöreä, jolloin  $a = r$ , on

$$r = \left[ \frac{\mu}{4\pi^2} \right]^{1/3} T^{2/3} \quad (2.4)$$

Toisin sanoen radan säde on vakio ja ainoastaan kiertoajasta riippuvan termin tulo. Tästä johtuen satelliitteja suunniteltaessa haluttu kiertoaika määrää satelliitin kiertokorkeuden. [3]

## Kiertoradat

Satelliitit kiertävät maapalloa tavallisesti ellipsiratoja pitkin. Jos satelliitti pysyy maasta katsottuna paikoillaan, on satelliitin kiertonopeus maan ympäri yksi tähti-vuorokausi eli 23 h 56 min 4.9 s. Mikäli tämän lisäksi satelliitti kiertää maapalloa päiväntasaajan tasossa, satelliitin sanotaan olevan geostationäärisellä (GEO) radalla. [4] Geostationäärinen rata on täysin ympyrä. Tällaista rataa ei käytännössä pystytä kuitenkaan saavuttamaan ilman aktiivista ja tarkkaa satelliitin ohjausta. Tällainen ohjaus kuitenkin kuluttaisi huomattavia määriä satelliitin polttoainetta ja täten lyhentäisi satelliitin käyttöikää niin paljon, ettei sitä kannata tehdä. Käytännössä kaikilla satelliittiradoilla on inklinaatiota ja ne voivat myös olla lievästi



Kuva 1: Keplerin toinen laki

elliptisiä. Inklinaatio tarkoittaa kiertoradan kaltevuutta maan ratatasosta. Tarkkaan ottaen geostationäärisiä-ratoja tulisi kutsua geosynkroonisiksi (GSO-radoiksi). Termejä käytetään kuitenkin sekaisin ja usein käytännön satelliitin rataa kutsutaan geostationääriseksi radaksi, vaikkei se sitä tarkkaan ottaen olisikaan. Tällaisen radan etu on se, että sillä ollessaan satelliitti pysyy maasta katsottuna käytännössä paikoillaan, jolloin maa-aseman antennin suuntaaminen kertaalleen riittää, eikä tarvita kallista ja monimutkaista satelliitinseurantajärjestelmää. Geosynkroninen rata takaa myös erittäin laajan palvelualueen. Haittapuolina puolestaan tällaisilla radoilla on pitkät etäisyydet, joiden vuoksi viiveet ovat suuret. Geosynkronisella radalla kulkevien satelliittien korkeus maanpinnasta on noin 35800 km, joten maapallon säteen ollessa 6370 km, on satelliittien kiertoradan säde noin 42000 km. Pitkien etäisyyksien vuoksi myös siirtoteiden vaimennukset ovat merkittäviä geosynkronisilla radoilla.

Näiltä radoilta ei voida palvella asiakkaita korkeimmilla leveyspiireillä. Korkeim-



mat leveyspiirit, joilta GSO-satelliitit ovat nähtävissä yli 10 asteen elevaatiokulmassa ovat 70 astetta eteläistä tai pohjoista leveyttä. Miniminä tehokkaalle satelliittitietoliikenteelle pidetään usein 10 asteen elevaatiokulmaa, sillä pienemmällä korotuskulmilla radiosäteen kaartuminen tulisi ottaa huomioon, mikä lisää entisestään säteen ilmakehässä kulkemaa matkaa ja täten kasvattaa entisestään signaalin vaimennusta. [3]

Matala ympyrärata (LEO, Low Earth Orbit) on toinen yleinen satelliittien käyttämä rata. LEO-radalla olevien satelliittien korkeus maanpinnasta on 160-1500 kilometriä. Verrattuna GEO- ja GSO-ratojen satelliittien tietoliikennelinkkeihin LEO-radan satelliittien linkeissä on huomattavasti pienemmät etenemishäviöt, sillä yhteysväli on huomattavasti lyhyempi LEO-satelliittien linkeissä. Myös etenemisviive on luonnollisesti LEO-satelliiteilla pienempi verrattuna satelliitteihin, jotka ovat paljon kauempana maa-asemasta. Myös maapallon napa-alueille voidaan luoda yhteys matalalla ympyräradalla olevilla satelliiteilla. LEO-satelliittien huono puoli sen sijaan on rajoitettu yhteysaika, sillä satelliitti on maa-aseman näköpiirissä ainoastaan 8-10 minuuttia kerrallaan. Tämän vuoksi täydellisen yhteyden takaamisen saavuttamiseksi tarvitaan maata kiertäville radoille useita satelliitteja sekä maa-asemiin, joissa käytetään kapeakeilaisia antenneita, satelliitin seurantajärjestelmiä, jotka lisäävät kustannuksia. Voidaan myös käyttää ympärisäteileviä antenneita, joissa ei satelliitinseurantaa tarvita. LEO-satelliitit ovat suosittuja mobiileissa satelliittitietoliikennejärjestelmissä. LEO- ja GSO-satelliittien lisäksi yleisiä ratoja ovat korkea ympyrärata (Medium Earth Orbit, MEO) sekä korkea elliptinen rata (Highly Elliptical Orbit, HEO). Korkeat ympyräradat takaavat huomattavasti suuremman palvelualueen kuin matalammat ympyräradat.

MEO-radalla satelliittien etäisyys maanpinnasta on 10000-20000 kilometriä, joten radalla olevat satelliitit sijoittuvat GSO- ja LEO-radalla olevien satelliittien väliin. Korkealla ympyräradalla oleva satelliitti on kerralla paikoillaan olevan maa-aseman näkyvissä yhdestä kahteen tuntia, joten tarvittavien satelliittien määrä on pienempi kuin LEO-radalla. On kuitenkin hyvä muistaa, että satelliitin lähetys korkeammalle radalle on kalliimpaa. MEO-radalla maata kiertäviä satelliitteja käytetään muun muassa paikannusjärjestelmissä, kuten laajasti käytetyssä GPS-järjestelmässä (Global Positioning System).

Korkeita elliptisiä ratoja käytetään takaamaan linkin kattavuus suurilla leveyspiireillä maa-asemille, joissa tarvitaan pidempiä käytettävyyssajoja kuin mitä LEO-satelliiteilla pystytään takaamaan. HEO-radan satelliitti on kerrallaan näkyvissä maa-asemalla 8-10 tuntia. [3]

## Eleaatio- ja atsimuuttikulmat

Eleaatio- ja atsimuuttikulmat ovat tärkeitä parametreja maa-aseman suuntauksessa. Eleaatiokulma kuvaa antennin korotuskulmaa, jossa satelliitti on näkyvissä. Eleaatiokulma voidaan laskea, jos tiedetään maa-aseman paikan pituus- ja leveyspiiri sekä satelliitin pituuspiiri.

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{r_e + h_{GSO}}{d} \sqrt{1 - \cos^2(B) \cos^2(L_{earth})} \right) \quad (2.5)$$

missä  $r_e$  maapallon säde,  $h_{GSO}$  geosynkroonisen radan korkeus maanpinnasta,  $d$  maa-aseman ja satelliitin etäisyys kilometreissä,  $B$  maa-aseman ja satelliitin pituuspiirien erotus asteissa sekä  $L_{earth}$  maa-aseman leveyspiiri asteissa. Maa-aseman ja satelliitin etäisyys voidaan laskea kaavalla

$$d = \sqrt{R^2 + r_s^2 - 2Rr_s \cos(\Psi_E) \cos(B)} \quad (2.6)$$

missä  $R = \sqrt{l^2 + z^2}$  ja  $\Psi_E$

$$\Psi_E = \tan^{-1} \left( \frac{z}{l} \right). \quad (2.7)$$

Apumuuttuja  $z$  on

$$z = \frac{r_e(1 - e_e^2)}{\sqrt{1 - e_e^2} \sin^2(L_{earth})} \quad (2.8)$$

ja apumuuttuja  $l$

$$l = \frac{r_e}{\sqrt{1 - e_e^2} \sin^2(L_{earth})} \quad (2.9)$$

missä  $e_e$  on maapallon eksentrisyys, jonka arvo on 0.08182. [3] Atsimuuttikulma puolestaan kertoo ilmansuunnan, jossa haluttu satelliitti näkyy. Se saadaan kaavalla

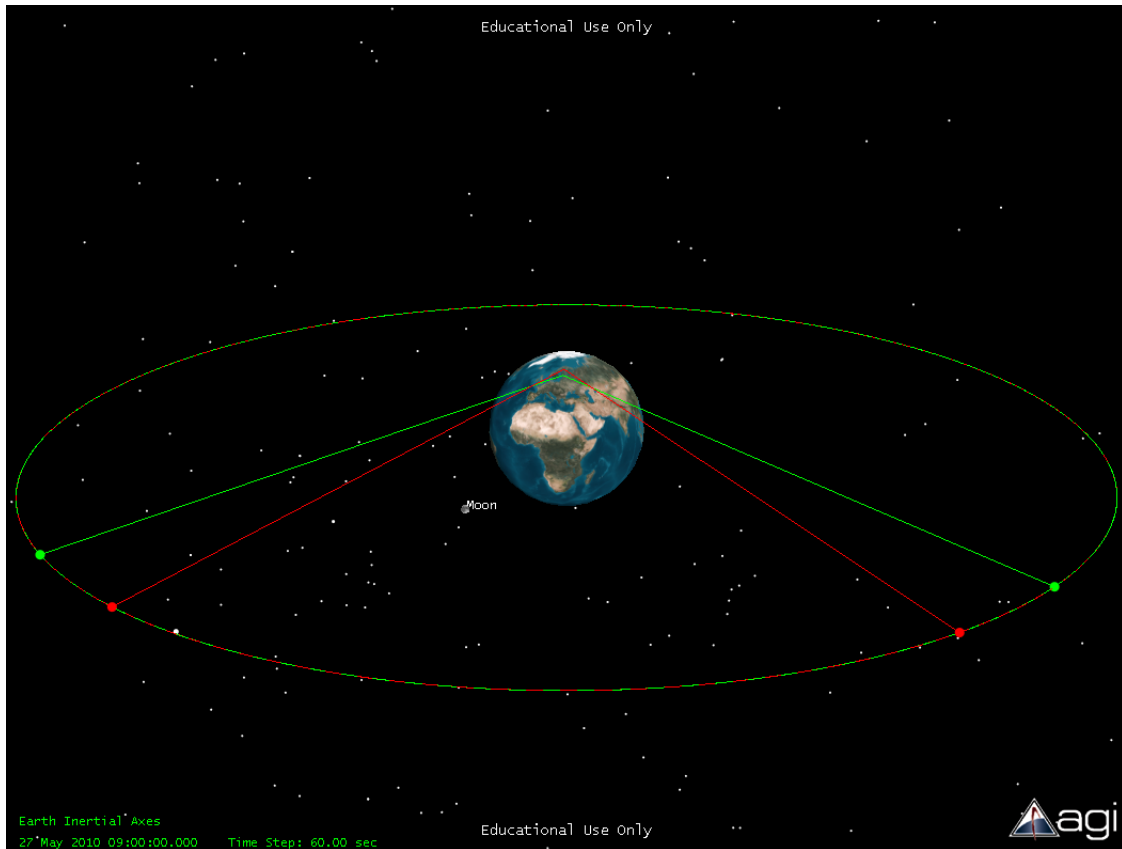
$$\psi = \arctan \left[ \frac{\sin(B)}{\sin(L_{earth}) \cos(B) - \tan(L_{sat}) \cos(L_{earth})} \right] \quad (2.10)$$

missä  $L_{sat}$  on satelliitin leveyspiiri, joka on geosynkronisilla radoilla 0 astetta. [4]

Usein satelliittilinkeissä pyritään, mikäli mahdollista, välttämään alle kymmenen asteen korotuskulmia. Tämä rajoittaa käytettävissä olevien satelliittien lukumäärää ja suosii maa-aseman sijoittamista mahdollisimman lähelle päiväntasaajaa. Kuvassa 2 on esitetty Helsingistä ja Rovaniemeltä näkyvä geosynkronisen radan osa, joka näkyy yli 10 asteen korotuskulmalla. Rovaniemeltä yli 10 asteen korotuskulmilla näkyy geosynkronisella radalla satelliitit, jotka ovat pituuspiireillä 10W-62E. Sen sijaan Helsingistä on näkyvissä vastaavalla yli 10 asteen elevaatiokulmalla geosynkronisen radan satelliitit pituuspiireiltä 24W-75E. Satelliitit ovat käytettävissä myös alle 10 asteen korotuskulmalla, mutta niissä tapauksissa tulee muiden vaimennusten lisäksi ottaa huomioon myös signaalin kaartuminen.

### 2.3 Satelliittitietoliikenteen säännökset ja standardit

Satelliittioperaattorien ja satelliittien omistajien tulee toimia virallisten säännösten mukaan. Säännökset sisältävät määräyksiä taajuudenvallinnasta, maksimaalisesta lähetystehosta sekä satelliittien paikasta geosynkronisella kiertoradalla. Tarkkojen määrittelyiden tarkoitus on minimoida radiotaajuuksilla tapahtuvaa interferenssiä sekä järjestelmien välistä keskinäisinterferenssiä. Mahdollista radiojärjestelmien interferenssiä syntyy muiden satelliittijärjestelmien lisäksi myös maanpäällisistä radiojärjestelmistä sekä muista järjestelmistä jotka säteilevät energiaa samalla taajuuskaistalla. [3]



Kuva 2: 10°elevaatiokulman rajat vihreällä Helsingistä ja punaisella Rovaniemeltä

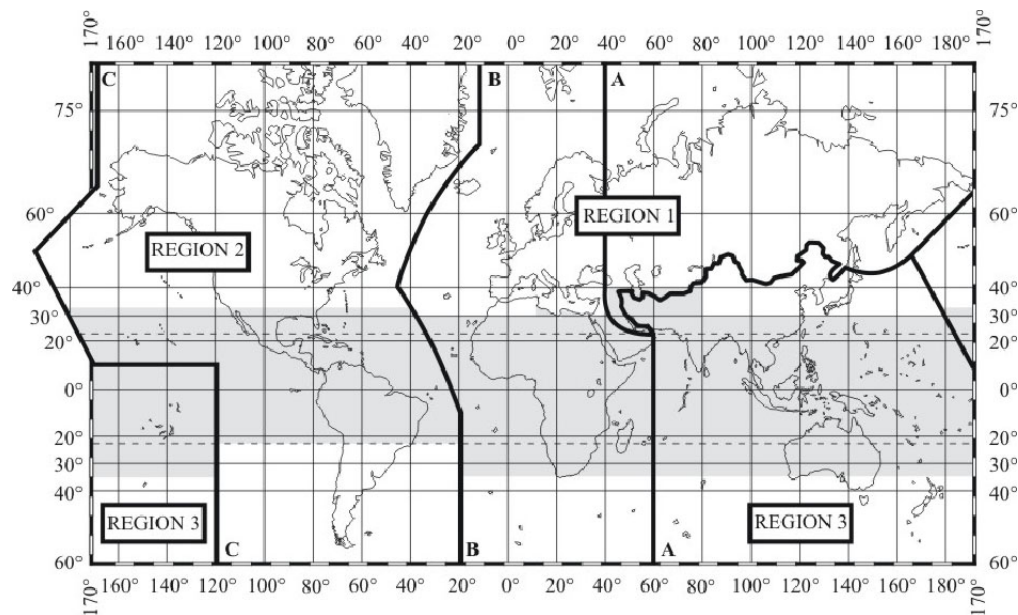
Kansainvälinen televiestiliitto (ITU, International Telecommunication Union) on Yhdistyneiden Kansakuntien (YK) alainen organisaatio, jossa julkinen ja yksityinen sektori koordinoivat maailmanlaajuisesti tietoliikenneverkkoja ja -palveluita. ITU jakaantuu kolmeen sektoriin radioviestintäsektoriin (ITU-R), televiestintäsektoriin (ITU-T) sekä kehityssektoriin (ITU-D). Radiojärjestelmien kannalta tärkein sektori ITU-R koostuu seitsemästä tutkimusryhmästä (SG, Study Group) sekä useista työryhmistä (WP, Working Parties). Esimerkiksi signaalin etenemistä tutkii tutkimusryhmä 3 (SG3, Study Group 3). Radiospektrin jaon lisäksi ITU vastaa myös satelliittien kiertoradoilla paikkojen jaosta. ITU-R:n suositukset (Recommendations) ja raportit (Reports) sisältävät tärkeää tietoa tietoliikennejärjestelmien suunnittelijoille. Suositusten ja raporttien tarkka seuraaminen on tärkeää, jotta suunniteltavista järjestelmistä tulee tehokkaita ja muiden järjestelmien kanssa yhteensopivia. [5]

Käytettävä palvelu ja satelliittimaa-aseman paikka määrittävät satelliittilinkissä käytettävät standardit ja säännökset. Maa-aseman paikan osalta ITU on jakanut maapallon kolmeen alueeseen, joissa kussakin on palvelut jaoteltu omille taajuuksilleen itsenäisesti muista alueista riippumattomasti. ITU:n maantieteellinen jako on esitetty kuvassa 3. Karkeasti jaoteltuna alueeseen 1 (Region 1) kuuluu Eurooppa, Afrikka ja entisen Neuvostoliiton maat, alueeseen 2 (Region 2) Amerikoiden valtiot sekä alueeseen 3 (Region 3) läntisen Tyynenmeren alueen maat sekä osa Etelä-Aasiaa.

ITU:n lajitteluun mahdollisista satelliittipalveluista kuuluu muun muassa

- Kiinteät satelliittipalvelut (FSS, Fixed Satellite Service)
- Televisiolähetykset (BSS, Broadcasting Services)
- Mobiilit satelliittipalvelut
- Satelliittinavigointipalvelut
- Ilmatieteelliset satelliittipalvelut

Nämä palveluluokat jakaantuvat vielä alaluokkiin. Esimerkiksi mobiilit satelliittipalvelut jakaantuvat vielä maanpäällisiin, merenkulussa käytettäviin sekä ilmailussa käytettäviin mobiileihin satelliittipalveluihin. [3]



Kuva 3: ITU:n palvelualueet [6]

## 2.4 Taajuuskaistat

Eräs tärkeä satelliittilinkin ominaisuus, joka tulee ottaa huomioon linkkiä suunniteltaessa, on käytettävä taajuus. Signaalin aallonpituutta tarvitaan laskettaessa etenemistien aiheuttamia vaimennuksia, jotka ovat taajuudesta riippuvaisia. Järjestelmän suunnittelijan on myös huomioitava kansainväliset ja kansalliset säännökset ja standardit käytettävän taajuuden valinnassa.

Taajuuskaistojen jaotteluun on käytössä kaksi menetelmää. Kirjain-jaottelu perustuu 1940-luvulla käytettyihin tutkasovellusten taajuusjaotteluun. Kyseisessä taajuusjaottelussa taajuudet on jaoteltu 1 GHz:stä 110 GHz:iin. Satelliittitietoliikenteessä käytettävä kirjain-jaottelu ja kaistojen yleisimmät käyttötarkoitukset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1: Satelliittiyhteyksien taajuuskaistat kirjainjaottelun mukaan

Taajuuskaista:	Taajuudet (GHz)	Käyttötarkoitus
L	1-2	Mobiilit satelliittipalvelut ja navigointipalvelut
S	2-4	Mobiilit satelliittipalvelut
C	4-8	Puhelinpalvelut ja tutkimuskäyttö
X	8-12	Sotilassovellukset ja luotaimet
Ku	12-18	Televisio- ja laajakaistapalvelut
K	18-27	Laajakaistapalvelut
Ka	27-40	Laajakaistapalvelut, Tutkimuskäyttö
V	40-75	Tutkimuskäyttö
W	75-110	

L- ja S-taajuusalueita käytetään pääasiassa mobiileihin satelliittipalveluihin sekä navigointisovelluksiin. Muun muassa maailmanlaajuinen paikannusjärjestelmä (GPS, Global Positioning System) toimii L-taajuuskaistalla. Näillä taajuusalueilla ionosfäärin ilmiöt saattavat häiritä signaalin etenemistä, mutta esimerkiksi sade ei merkittävästi vaimenna signaalia.

C-, X- ja Ku-kaistat on sijoitettu välille 4-18 GHz. Näillä kaistoilla voidaan tarjota suurempia kaistanleveyksiä kuin edellä esitetyillä L- ja S-kaistoilla. C-kaistaa käytetään muun muassa puhelinpalveluissa sekä tutkimuskäytössä. Nämä taajuudet ovat myös suosittuja yhteydenpitoon syrjäisille alueille, joihin ei ole saatavilla kaapeliyhteyttä tai se on rajoitettu. X-kaista on sen sijaan varattu viranomais- ja sotilaskäyttöön. Tällä taajuusalueella sade ja pilvet eivät vielä vaikuta merkittävästi yhteyden tilaan, joten alue on haluttu antaa viranomaisten käyttöön, jossa yhteyden luotettavuus on erittäin tärkeää. Ku-kaistalla käytetään muun muassa satelliittitelevisiota sekä laajakaistapalveluita. Näillä taajuuksilla ilmakehän ilmiöt, erityisesti sade, saattaa jo merkittävästi heikentää yhteyden laatua, joten se on otettava huomioon yhteyttä suunniteltaessa.

K-, Ka-, V- ja W-taajuuskaistat sijaitsevat yli 18 GHz:n taajuuksilla. Toistaiseksi näiden taajuuskaistojen käyttö on satelliittitietoliikenteessä keskittynyt tutkimuskäyttöön. K- ja Ka-kaistoja käytetään kuitenkin jo jonkin verran myös satelliittitietoliikenteessä. Erityisesti V- ja W-kaistoilla sade ja muut vaimennukset aiheuttavat niin suuria ongelmia, että yhteyden katkeaminen on pakko hyväksyä erityisesti rankkasateiden aikana. [7]

Toinen menetelmä taajuuksien jaotteluun on aallonpituuteen perustuva jaottelu. Tässä menetelmässä taajuudet on jaoteltu 3 Hz:sta 300 GHz:iin, toisin sanoen aallonpituuksina ilmaistuna 100 000 km:stä 1 mm:n aallonpituuksiin, ja niille on annettu kaksi- tai kolmekirjaimisia lyhenteitä. Tämän menetelmän mukainen jaottelu on esitetty taulukossa 2.

Satelliittitietoliikenteessä nousevalle ja laskeva siirtosuunta toimivat eri taajuuksilla. C-kaistalla nousevan siirtosuunnan taajuus on 6 GHz ja laskevan siirtosuunnan 4 GHz. Vastaavat taajuudet Ku-kaistalla ovat 14 GHz nousevalla ja 12 GHz

Taulukko 2: Satelliittiyhteyksien taajuuskaistat aallonpituuden mukaan

Taajuus	Aallonpituus (m)	Lyhenne
3 Hz-30 kHz	$10^8 - 10^4$	VLF (Very Low Frequency)
30 kHz - 300 kHz	$10^4 - 10^3$	LF (Low Frequency)
300 kHz - 3 MHz	$10^3 - 10^2$	MF (Medium Frequency)
3 MHz - 30 MHz	$10^2 - 10^1$	HF (High Frequency)
30 MHz - 300 MHz	$10^1 - 10^0$	VHF (Very High Frequency)
300 MHz - 3 GHz	$10^0 - 10^{-1}$	UHF (Ultra High Frequency)
3 GHz - 30 GHz	$10^{-1} - 10^{-2}$	SHF (Super High Frequency)
30 GHz - 300 GHz	$10^{-2} - 10^{-3}$	EHF (Extremely High Frequency)

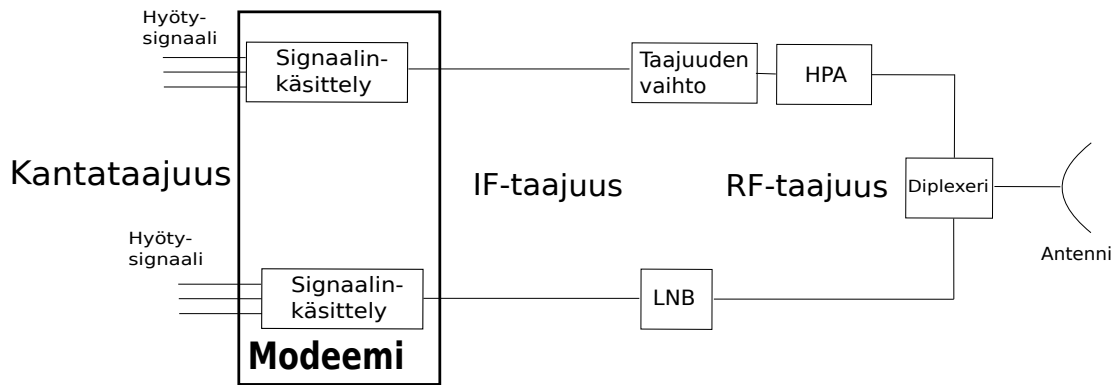
laskevalla siirtosuunnalla. Tässä työssä tullaan ensisijaisesti käyttämään kirjainjaottelun mukaista taajuuskaistojen jaottelua ja keskitytään ensisijaisesti C-, Ku- ja Ka-kaistoihin.

## 2.5 Maa-asemat

Satelliittitietoliikennejärjestelmät koostuvat kahdesta lohkoista. Maanpäällinen lohko sisältää vastaanottavan ja lähettävän maa-aseman sekä rajapinnan joka liittää käyttäjän järjestelmään. Maa-aseman ominaisuudet riippuvat paljon siitä millaisessa tietoliikennejärjestelmässä ja mihin sovellukseen maa-asemaa käytetään. Toinen satelliittitietoliikennejärjestelmän lohko on avaruuslohko, joka sisältää maata kiertävän satelliitin sekä maa-aseman, jolla pystytään pitämään satelliitti toiminnassa. Satelliittitietoliikennejärjestelmien avaruuslohkoa on käsitelty tarkemmin kappaleessa 2.6. [3]

Erilaiset maa-asemat saattavat erota suuresti toisistaan sekä hinnaltaan että monimutkaisuudellaan. Yksinkertaisimmillaan maa-asemat kykenevät ainoastaan vastaanottamaan satelliitin lähettämää signaalia. Satelliittitelevision vastaanottoon kykenevät laitteistot ovat esimerkkejä tällaisista maa-asemista. Monimutkaisimmillaan satelliittimaa-asemilla on useita isoja antennoja, joiden avulla kommunikoidaan useiden eri satelliittien kanssa. [8]

Kuvassa 4 on esitetty maa-aseman lohkokaavio. Kyseessä on järjestelmä, joka kykenee sekä signaalin lähettämiseen ja vastaanottoon. Kuvan ylemmässä haarassa on esitetty nouseva siirtosuunta, jossa maa-asemalta lähtevä signaali lähetetään satelliitille. Hyötysignaalin saapuessa sille tehdään ensin signaalinkäsittelyä. Signaalinkäsittely tarkoittaa tässä tapauksessa käytännössä muun muassa signaalin kanavointia ja modulointia. Kanavointi ja modulointi esitellään lyhyesti kappaleessa 2.7. Signaalinkäsittelyn jälkeen signaali on välitaajuudella (IF, Intermediate Frequency), jolla se siirretään antennille. Antennilla signaali muunnetaan vielä ennen lähetystä oikealle taajuudelle ja vahvistetaan. Vahvistus tapahtuu HPA-lohkossa (High-Power Amplifier). HPA-lohkoon saapuva teho on tyypillisesti vain joitakin milliwatteja, mutta se vahvistetaan jopa kilowatteihin, jotta satelliitti pystyisi vastaanottamaan pitkällä etenemistiellä vaimetuneen signaalin oikein. Usein käytetään kahta rinnak-



Kuva 4: Maa-aseman lohkokaavio

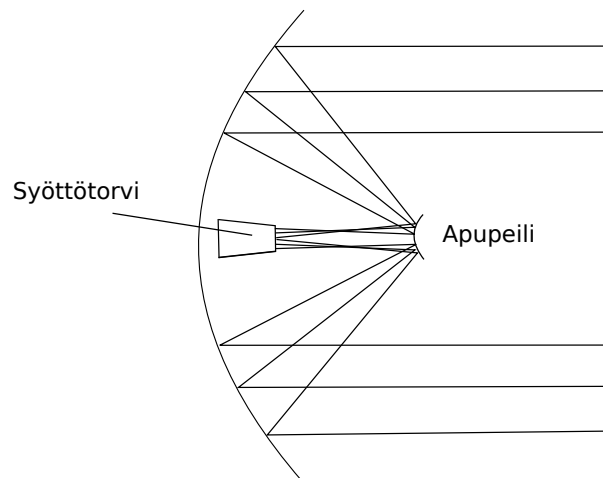
kaista HPA:ta, millä saavutetaan suoritusvarmuutta tilanteissa, joissa toinen vahvistimista hajoaa. Kahden vahvistimen rinnakkainen käyttö myös pidentää vahvistinten elinikää. Vahvistuksen jälkeen lähetettävä signaali ohjataan diplexerin kautta antennille. Diplexerin avulla antenni pystyy käsittelemään samanaikaisesti lähtevää ja saapuvaa radiosignaalia. Suurimmat nousevan siirtosuunnan suorituskykyyn vaikuttavat tekijät ovat antennin suuntaaminen sekä vahvistus, HPA-vahvistimen teho sekä etenemistien ominaisuudet. [8]

Laskevan siirtosuunnan käsittely maa-asemassa on kuvattu kuvan 4 alemmassa haarassa. Heti signaalin saavuttua se vahvistetaan LNA- (Low-Noise Amplifier) tai LNB-vahvistimessa (Low-Noise Block Converter). Mikäli käytössä on LNA-vahvistin, antennille saapunut signaali vahvistetaan ja siirretään aaltoputkea pitkin varsinaiselle vastaanottimelle. Vastaanottimella signaali muunnetaan ensin välitaajuudelle, minkä jälkeen suoritetaan signaalinkäsittely. LNB-vahvistimen ollessa käytössä signaali sekä vahvistetaan että muutetaan välitaajuudelle jo antennilla. Jos signaali siirretään välitaajuudelle jo antennilla, on signaali mahdollista siirtää antennilta modeemille koaksiaalikaapelia pitkin. Muunnos välitaajuudelle tehdään, koska satelliittitietoliikenteessä käytettävät taajuudet ovat niin suuria, että näillä taajuuksilla kaapeleilla esiintyy suuria etenemishäviöitä. Välitaajuudelle siirron jälkeen signaalia vielä vahvistetaan ennen demodulointia ja muuta signaalinkäsittelyä. Laskevassa siirtosuunnassa vastaanottimen tärkeimpiä ominaisuuksia ovat LNB:n ominaisuudet sekä vastaanottimen antennin vahvistus. [8]

Joskus satelliittimaa-asemaan tarvitaan lisäksi joitakin lisävarusteita. Jos käytetään erittäin suurta antennia, on lähetyskeila erittäin kapea. Tällöin maa-aseman pitää pystyä seuraamaan satelliitin tarkkaa paikkaa, vaikka käytettävä satelliitti olisikin geosynkroonisella radalla. Seurantalaitteiston on pystyttävä vaihtamaan sekä elevaatio- että atsimuuttikulmia. Sääto tehdään tietokoneen avulla etsimällä suurinta mahdollista vastaanotettavan signaalin tehoa. Toinen maa-aseman suunnittelussa huomioon otettava asia on varmistaa maa-aseman sähkönsaanti sähkökatkosten ajaksi. Mahdollisia tapoja sähkösaannin varmistamiseksi ovat varmistaa kaupallisen sähkölaitoksen tuottama virta useammasta kuin yhdestä lähteestä, akut sekä generaattorit. Järjestelmä on syytä suunnitella siten, että kun sähkölaitoksen virransaannissa esiintyy ongelmia, akuista aletaan ottaa välittömästi virtaa niin, ettei säh-

kövirran saannissa ole keskeytystä. Samanaikaisesti virransaannin häiriön ilmetessä generaattorit alkavat käynnistyä, ja niiden käynnistyttyä aletaan käyttää niitä akkujen asemesta. Virransaannissa tapahtuvista lyhyistä katkoksista voidaan suojautua UPS-laitteilla (Uninterruptible Power Supply). Suomen ilmastossa myös antennille kerääntyvä lumi ja jää saattavat häiritä maa-aseman toimintaa. Satelliittimaa-asemiin onkin suunniteltu lämmityslaitteita, jotka sulattavat jään ja lumen. Näiden laitteiden hankintaa operaattorin on siis syytä harkita suunniteltaessa satelliittimaa-asemaa Suomeen. [9]

Maa-asemissa käytettävien antennien on oltava tarkasti suunnattavia. Lähetettäessä antennin tulee säteillä energiaa ainoastaan erittäin kapealle alueelle ja vastaanotettaessa ainoastaan tarkasti tietystä suunnasta tuleva signaali tulisi vastaanottaa. Antennin ominaisuudet tulisi olla sellaiset, että kiertoradan kaarella voi toimia  $2^\circ$  erotuksella samalla taajuudella vierekkäinen satelliitti, jonka toimintaa satelliittiyhteys ei saa häiritä. [8] Yleisin maa-asemissa käytettävä antennityyppi on Cassegrain-antenni. Cassagrain-antenneissa suuri paraboloidi-peili heijastaa saapuvan signaalin apupeiliin, josta saapuva aalto heijastuu vielä syöttötorveen. Kuvassa 5 on havainnollistettu Cassagrain-antennien toimintaa.[4]



Kuva 5: Cassagrain-antennin toiminta

## 2.6 Tietoliikennesatelliitit

Satelliittitietoliikennejärjestelmien avaruuslohkoon kuuluu maata kiertävä satelliitti sekä maassa oleva maa-asema, jolla pystytään pitämään satelliitti toiminnassa. Tietoliikennesatelliitin laitteisto voidaan jakaa kahteen kategoriaan: väylä (bus) sekä kuorma (payload). Väylä tarkoittaa tässä tapauksessa satelliitin hallintalaitteistoa kuten esimerkiksi tehojärjestelmää, kiertoradanhallintaa sekä korkeudenhallintaa. Kuorma sen sijaan tarkoittaa satelliitin laitteistoja joiden avulla tarjotaan asiakkaille satelliittipalveluita. Kuorma voidaan jakaa vielä lähetin-vastaanotin- (transponder) ja antenni-alijärjestelmiin. [3]



## Satelliittiväylä

Eräs tärkeimmistä satelliitin hallintaan liittyvistä kysymyksistä on kuinka pitää satelliitti vakaana ja antennit jatkuvasti suunnattuna maata kohti. Tähän ongelmaan on kaksi yleisesti käytettyä ratkaisua, jotka ovat pyörimisen vakauttaminen (spin stabilization) sekä rungon vakauttaminen (body stabilization). Pyörimisen vakauttamista käytetään tavallisesti sylinterin muotoisissa satelliiteissa, koska menetelmän toimimiseksi satelliitin on oltava mekaanisesti tasapainossa akselinsa suhteen. GSO-satelliiteilla satelliitin pyörimisakseli pidetään yhdensuuntaisena maapallon pyörimisakselin kanssa. Rungon vakauttamismenetelmää käytettäessä ei sen sijaan satelliitin tarvitse olla sylinterin muotoinen tai tasapainossa yhdenkään akselinsa suhteen.

Tehojärjestelmä pyrkii pitämään huolen siitä, että satelliitilla on käytössä riittävästi sähkövirtaa. Pääasiassa satelliitti saa tarvitsemansa sähköenergian aurinkopaneeleista. Aurinkopaneeleiden hyötysuhde laskee avaruudessa vuosien kuluessa, joten satelliiteissa joudutaan käyttämään useita aurinkopaneeleita, jotta päästäisiin tavallisesti satelliittien tavoite-elinikänä pidettyyn 15 vuoteen. Aurinkopaneeleiden lisäksi satelliiteilla on oltava myös akut turvaamaan virransaanti tilanteissa joissa aurinkoa ei näy. Useimmiten satelliiteissa käytettävät akut ovat joko Nikkeli-Cadium- tai Nikkeli-Vety-akkuja. GSO-rataa kiertävillä satelliittien rata kulkee vuosittain kahdesti maan varjossa. Nämä pimennysajat sijoittuvat kevät- ja syyspäiväntasausten aikoihin. Pimennykset alkavat 23 päivää ennen päiväntasauksia ja päättyvät samat 23 päivää niiden jälkeen. Pisimmillään satelliitit ovat maan varjossa pimennyspäivinä, jolloin ne eivät näe aurinkoa noin 70 minuuttiin.

Myös satelliitin suunnan hallinta on tärkeä satelliitin valvontaan liittyvä tehtävä, sillä on tärkeää että antennien lähetyскеilat ovat tarkasti suunnattu oikealle alueelle. Satelliitin suuntaukseen vaikuttaa muun muassa auringon, kuun ja muiden taivaan kappaleiden satelliittiin aiheuttama gravitaatiovoima sekä maan magneettikenttä. Satelliittien suuntausta tarkkaillaan infrapunatunnistimilla, jotka tarkkailevat maapallon reunaa avaruutta vasten. Mikäli satelliitin havaitaan olevan väärin suuntautuneena, käynnistetään suunnanhallintalaitteisto, joka palauttaa oikean suuntauksen. Tietoliikennesatelliiteissa suuntaus korjataan tavallisesti suihkumoottoreilla (gas jet), ionimoottoreilla (ion thrusters) tai vauhtipyörillä (momentum wheels).

Kiertoradan hallinta tarkoittaa hallintamenetelmää, jolla satelliitti pyritään pitämään omalla paikallaan kiertoradalla. Maapallon epätasaisuuksien vuoksi satelliitit pyrkivät ajautumaan pois omalta paikaltaan GSO-radalla. Tätä ilmiötä eliminoidaan muuttamalla satelliitin nopeutta suihkumoottorien avulla, jolloin satelliitti palautuu omalle paikalleen. Tällaisia itä-länsi suuntaisia korjauksia joudutaan tekemään tyypillisesti kahden-kolmen viikon välein. Kiertoradalla satelliitin paikan korjaukseen käytetään samaa menetelmää kuin satelliitin suunnan hallintaan. C-kaistalla toimivan satelliitin on itä-länsi suunnassa oltava aina  $\pm 0.1$  asteen sisällä sille annetusta tarkasta paikasta. Ku-kaistalla toimivat satelliitin on oltava puolestaan aina  $\pm 0.05$  asteen sisällä omasta paikastaan itä-länsi suunnassa. GSO-radalla  $\pm 0.1$  asteen toleranssi tarkoittaa noin 150 km:n liikkumavaraa ja  $\pm 0.05$  asteen toleranssi noin 75 km:n liikkumavaraa, jolla satelliitin tulee olla. Pohjois-etelä suunnassa raja-arvot ovat samat kuin itä-länsi suunnassakin. Pohjois-etelä suunnassa

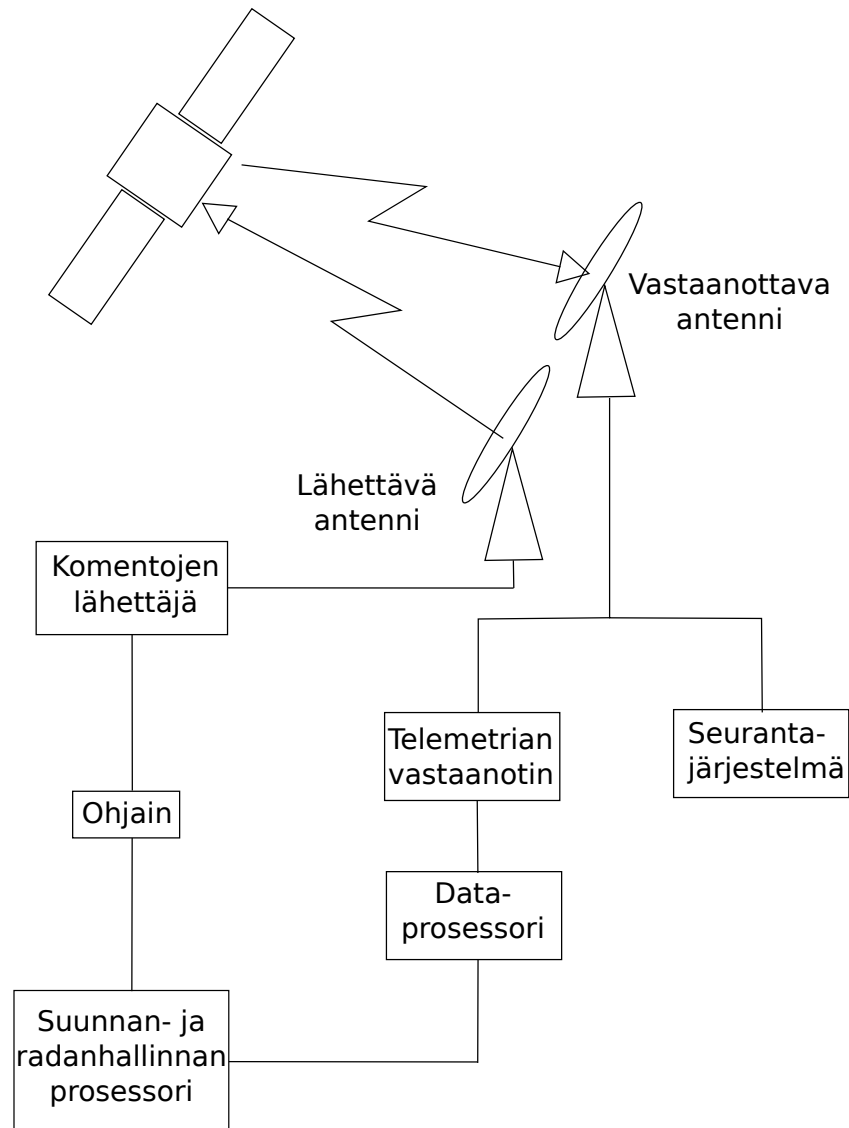
satelliittiin vaikuttaa auringon ja kuun gravitaatiovoimat, jotka vetävät satelliittia omalta paikaltaan noin  $0.075^\circ$  kuukaudessa. Pohjois-etelä suuntainen paikankorjaus kuluttaa selkeästi itä-länsi suuntaista korjausta enemmän polttoainetta, joten sitä pyritään mahdollisuuksien mukaan välttämään. Satelliitin etäisyys maasta saa vaihdella  $\pm 0.1\%$ , mikä tarkoittaa noin 72 km:n vaihteluväliä GSO-radalla jolla satelliittien etäisyys maasta on 36 000 km.

Vaikka avaruuteen lähetettävän satelliitin painosta jopa puolet tulee polttoaineesta, jota käytetään kiertoradan ja suunnan hallintaan, on polttoaineen loppuminen on usein syy, joka päättää tietoliikennesatelliitin eliniän. Usein polttoaineen loppuessa satelliitin sähköiset järjestelmät ovat vielä hyvässä kunnossa.

Lämmön hallinta on viides satelliitin hallintaan liittyvä järjestelmä. Kiertoradalla kiertäessään satelliitti altistuu suurille lämpötilanvaihteluille, sillä satelliitin toinen puoli saattaa olla auringon kuumentama kun samanaikaisesti toisen puolen lämpötila on erittäin matala sen ollessa suuntautuneena kylmään avaruuteen. Satelliiteissa on lisäksi myös paljon laitteita, jotka synnyttävät lämpöä. Satelliitin lämmön hallinta järjestelmä on kehitetty suurten lämpötilaerojen tasoittamiseen poistamalla tai siirtämällä lämpöä, jotta satelliitille saataisiin mahdollisimman tasainen lämpötila. Tasaisen lämpötilan saavuttamiseksi on kehitetty useita eri tekniikoita:

- Lämpökilvet ja -peitot, jotka asetetaan kriittisille paikoille eristykseksi
- Säteilypeilit (radiation mirrors) sijoitetaan tärkeiden elektronisten laitteiden lähelle suojaamaan kriittisiä komponentteja
- Lämpöpumpuilla siirretään lämpöä teholaitteista kuten esimerkiksi vahvistimista satelliitin ulko- tai jäähdytysseiniin.
- Lämmittimiä käytetään luomaan sopivammat olosuhteet joillekin laitteille kuten esimerkiksi moottoreille, joille liian matalat lämpötilat aiheuttavat ongelmia

Seuranta-, telemetria-, hallinta- ja monitorointijärjestelmä (TTC&M, Tracking, Telemetry, Command and Monitoring) sisältää satelliitin hallintaan ja seurantaan liittyvää laitteistoa ja alijärjestelmiä, joiden avulla satelliitti pidetään turvallisesti oikealla paikalla omalla radallaan. Satelliitissa olevat TTC&M-järjestelmän osat ovat antenni, komentojen vastaanotin, telemetria-tiedon lähetin sekä anturit, jotka keräävät erilaista informaatiota esimerkiksi satelliitin paikasta. Telemetria-informaatiota TTC&M-järjestelmä saa muilta alijärjestelmiltä kuten esimerkiksi edellä esitetyltä satelliitin suunnanhallintajärjestelmältä. Komentojen vastaanotin puolestaan ohjaa saamansa käskyt edelleen muille alijärjestelmille, jotka säätelevät komentojen mukaan esimerkiksi antennien suuntausta tai muuta vastaavaa. TTC&M-järjestelmän maa-asemaan kuuluu antenni, telemetria-informaation vastaanotin, komentojen lähetin, seuraamisen alijärjestelmä sekä tarvittavat vastaanotetun informaation prosessointi- ja analysointityökalut. Tavallisesti kaikki TTC&M-järjestelmien toiminnot ovat automatisoituja. Tyypillinen TTC&M-järjestelmä on kuvattu kuvassa 6. Yksi TTC&M-maa-asema voi huolehtia samanaikaisesti useammasta satelliitista. [3]



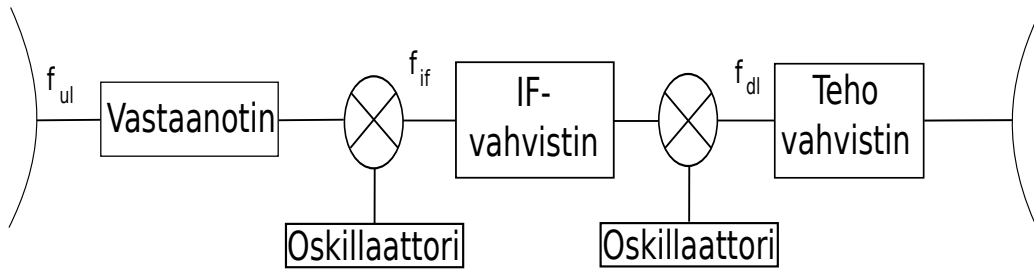
Kuva 6: Seuranta-, telemetria-, hallinta- ja monitorointijärjestelmä

### Satelliittikuorma

Satelliittien lähetin-vastaanottimet (transponders) sisältävät tietoliikenneyhteyteen tarvittavia komponentteja. Tietoliikennesatelliiteissa on tyypillisesti useita lähetin-vastaanottimia. Tosin osa tietoliikennekomponenteista voi olla yhteisesti useamman lähetin-vastaanottimen käytössä. Nykyisin tavallisessa tietoliikennesatelliitissa on 12, 24 tai 48 lähetin-vastaanotinta, joista jokainen toimii omalla taajuuskaistallaan.

Lähetin-vastaanottimien määrää voidaan lisätä entisestään vielä käyttämällä taajuuksien uudelleenkäyttöä. Taajuuksia voidaan käyttää uudelleen erottelemalla hyötysignaalit polarisaation avulla.

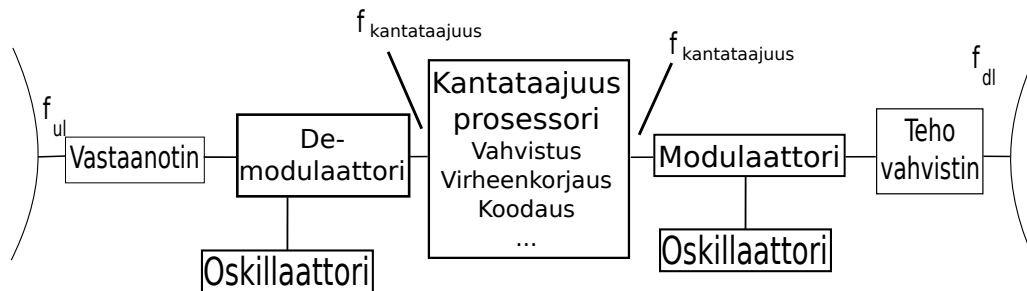
Tietoliikennesatelliittien lähetin-vastaanotin toteuttamiseen on kaksi tavallisesti käytettyä konfiguraatiota. Taajuuden muunnos lähetin-vastaanottimen idea on esitetty kuvassa 7. Signaalin saapuessa taajuuden muunnos lähetin-vastaanottimeen signaali muunnetaan ensin välitaajuudelle  $f_{if}$ , minkä jälkeen signaalia vahvistetaan. Vahvistuksen jälkeen signaali muunnetaan laskevan siirtosuunnan taajuudelle  $f_{dl}$  sekä vahvistetaan vielä kertaalleen ennen lähetystä. Taajuuden muunnos lähetin-vastaanottimia käytetään muun muassa kiinteissä ja mobiileissa satelliittitietoliikenneyhteyksissä.



Kuva 7: Satelliitin taajuuden muunnos lähetin-vastaanottimen lohkokaavio

Toinen yleisesti käytetty lähetin-vastaanotin malli on prosessoiva lähetin-vastaanotin (On-board processing transponder). Prosessoivan lähetin-vastaanottimen lohkokaavio on esitetty kuvassa 8. Prosessoivissa lähetin-vastaanottimissa saapuva signaali ensin demoduloidaan kantataajuudelle. Signaalin ollessa kantataajuudella signaalille voidaan tehdä signaalinkäsittelyä esimerkiksi vahvistusta sekä virheenkorjausta. Signaalinkäsittelyn jälkeen suoritetaan modulointi laskevan siirtosuunnan taajuudelle. Tämän jälkeen signaali vielä vahvistetaan ennen lähetystä vastaanottajalle. Tämän menetelmän etu on, että de-modulaation ja uudelleen modulaation avulla voidaan suorittaa signaalinkäsittelyä, jolla voidaan poistaa nousevan siirtosuunnan lisäämää kohinaa ja interferenssiä. Johtuen monimutkaisemmasta rakenteesta tällaiset lähetin-vastaanottimet ovat taajuuden muunnos lähetin-vastaanottimia kalliimpia. Niiden etu on kuitenkin parempi suorituskyky.

Satelliittien antennina yleisimmin käytetyt antennityypit ovat lineaariset dipoliantennit, torviantennit, paraboliset heijastinantennit (parabolic reflector antenna) sekä antenniryhmät (array antennas). Lineaariset dipoliantennit ovat isotrooppisia säteilijöitä, jotka säteilevät tasaisesti kaikkiin suuntiin. Vähintään neljä dipoliantennia asennetaan tavallisesti satelliittiin, jotta saavutetaan ympärisäteilevä säteilykuvio. Dipoliantenneita käytetään tavallisesti VHF- ja UHF-taajuuksilla satelliitin seurannan, hallinnan ja telemetriatiedon välitykseen. Torviantenneita käytetään



Kuva 8: Satelliitin prosessoivan lähetin-vastaanottimen lohkokaavio

satelliittitietoliikenteessä yli 4 GHz:n taajuuksilla erityisesti tilanteissa joissa tarvitaan leveä lähetyskeila. Tällaisilla antennneilla voidaan saavuttaa 20 dBi vahvistus yli 10 asteen keilanleveyksillä. Kapeampia keilanleveyksiä saavutetaan parabolisilla heijastin-antenneilla. Tällaiset antennit ovat yleisimpiä satelliittijärjestelmissä erityisesti yli 10 GHz:n taajuuksilla. Parabolisilla heijastinantenneilla saavutetaan suurempi vahvistus kuin torviantenneilla. Vahvistus voi olla 25 dBi keilanleveyden ollessa noin  $1^\circ$  antenneilla, jotka toimivat C-, Ku- ja Ka-kaistoilla. Antennit, joilla on erittäin kapea keilanleveys, voivat tarvita hyvin toimiakseen järjestelmiä, joilla antenni suunnataan tarkasti vastaanottimelle.

Neljäs satelliiteissa käytettävä antennityyppi on antenniryhmät. Antenniryhmät ovat useista pienistä antennielementeistä tehtyjä antenneita, joiden keila pystytään tarkasti suuntaamaan. Antennielementteinä voidaan käyttää esimerkiksi dipoli- tai torviantenneja. Keilanmuodostus voidaan tehdä erikseen jokaiselle antennielementille elektronisesti signaalin vaihetta muuntamalla. Näin antennin suuntaus voidaan tehdä elektronisesti ilman, että antennia tarvitsee fyysisesti kääntää. [3]

## 2.7 Satelliittitietoliikenneverkot

Tässä kappaleessa käydään muutamia tietoliikenneverkoissa käytettäviä menetelmiä ja pohditaan millaisia haasteita satelliittiyhteydet tuovat näiden menetelmien käyttöön. Menetelmiin tutustutaan erikseen OSI-mallin fyysiselle kerrokselle, siirtoyhteyserrokselle ja kuljetuserrokselle.

### 2.7.1 Fyysinen kerros

Fyysinen kerros on alin OSI-mallin kerroksista. Sen tehtäviin kuuluu huolehtia siirtoyhteyden sähköisistä ja mekaanisista yksityiskohdista. Fyysisellä kerroksella lähetettävä signaali muun muassa moduloidaan.

Satelliittijärjestelmissä käytettävä modulointi määrää saavutettavan satelliittiyhteyden käytettävyyden, tarvittavan lähetystehon ja kaistanleveyden. Monimutkaisilla modulaatiomenetelmillä saavutetaan yksinkertaisempia menetelmiä parempi spektrinkäytön tehokkuus, mutta niiden käyttöön vaaditaan yksinkertaisempia modulaatiomenetelmiä parempaa kantoaalto-kohinasuhdetta  $\frac{C}{N_0}$ . [10] Vertailtaessa maaseman sijoituspaikkakuntavaihtoehtojen soveltuvuutta sijoituspaikaksi on huomiotava, että jopa yhden desibelin ero kantoaalto-kohinasuhteessa saattaa merkitä sitä, että joudutaan tyytymään yksinkertaisempaan modulointiin. Se taas käytännössä tarkoittaa matalampaa tiedonsiirtonopeutta. Tavallisimmat modulaatiomenetelmät satelliittilinkeissä ovat QPSK, 8-PSK sekä 8- ja 16-QAM.

Fyysisellä kerroksella bittivirhesuhdetta joudutaan parantamaan käyttämällä erilaisia datan koodausmenetelmiä, jotka lisäävät signaaliin ylimääräisiä bittejä. Näiden ylimääräisten bittien avulla voidaan löytää datavirrasta virheet ja korjata ne. [11] Yksinkertaisimmillaan virhe voidaan havaita lisäämällä lähetettävään sanaan ylimääräinen bitti, jonka avulla voidaan esimerkiksi ilmaista onko sanassa olevien ykkösten määrä parillinen tai pariton. Tällaisella koodauksella ei kuitenkaan voida havaita virheen paikkaa, eikä sitä voida myöskään silloin korjata. Virheet myös jäävät havaitsematta, jos niitä tapahtuu datasanassa parillinen määrä.

Eräs satelliittiyhteyksissä käytetty virheenkorjauskoodausmenetelmä on turbokoodaus. Sen idea esiteltiin ensimmäisen kerran vuonna 1993 [12]. Turbokoodausmenetelmien avulla päästään tiedonsiirrossa lähelle Claude Shannonin asettamaa teoreettista ylärajaa tietoliikenneyhteydelle, joten niitä on alettu laajasti käyttää niin maanpäällisessä- kuin satelliittitietoliikenteessäkin. [9] Shannonin kanavakoodauslause määrää ylärajan kohinaisessa kanavassa tapahtuvan luotettavan tiedonsiirron nopeudelle. Turbokoodauksessa vastaanottimessa on oltava vähintään kaksi keskenään yhteistyötä tekevää dekodeeria. Dekoodaus perustuu niin sanottuun toistuvaan pehmeään päätöksentekoon, jossa jokaista viestiä dekodaataan useaan kertaan. Mitä useamman kerran kutakin viestin bittiä tutkitaan, sitä todennäköisempi arvio viestistä voidaan tehdä. Arvio ei kuitenkaan parane lineaarisesti toistomäärän kasvassa. Jo muutamalla toistolla päästään kuitenkin varsin hyvään suorituskyykyyn. [13]

### 2.7.2 Siirtoyhteyshierros

Siirrettävän tietovirran jakamisesta kehyksiin sekä siirtoyhteyshien resurssien jaosta huolehditaan siirtoyhteyshierroksella, joka on OSI-mallin toinen hierros.

Ongelma radiotietoliikenteessä on kuinka käytössä olevat resurssit kannattaa jakaa käyttäjien kesken siten, että satelliitin kapasiteetti, spektrin käyttö sekä käytettävyyden saadaan parhaaksi mahdolliseksi. Tämä on erilaisten MAC-protokollien (Multiple Access protocol) tehtävä. Satelliittiverkkojen on tuettava useita erilaisia liikennetyyppejä ja sovelluksia, joten kanavallepääsymenetelmien pitää pystyä myös nopeasti mukautumaan erilaisille yhteyshien laadun (QoS, Quality of Service) vaatimuksille. Menetelmän on myös oltava reilu kaikille käyttäjille. [14] MAC-protokollat voidaan jakaa kolmeen kategoriaan: kiinteisiin (fixed access protocols), kilpavaraukseen (contention-based protocols) sekä pyyntöön (demand-assignment protocols) pe-

rustuviin protokoliin.

Kiinteissä MAC-protokollissa siirtoresurssit on jaettu käyttäjille kiinteästi käyttäjille. Resurssit on jaettu taajuuden mukaan taajuusjakoisessa kanavoinnissa (FDMA, Frequency division multiple access), ajan mukaan aikajakoisessa kanavoinnissa (TDMA, Time division multiple access) sekä koodin mukaan koodijakoisessa kanavoinnissa (CMDA, Code division multiple access). Esimerkiksi aikajakoisessa kanavoinnissa lähetysketket annetaan kullekin asemalle säännöllisesti. [11]

Kilpavarausprotokoliin kuuluu esimerkiksi ALOHA ja aikaajaettu-ALOHA (slotted ALOHA), jotka ovat usein satelliittiverkoissa käytettyjä kanavallepääsymenetelmiä. Näissä menetelmissä käyttäjä, jolla on tarve käyttää verkkoa käyttää sitä huolimatta siitä ovatko muut verkonkäyttäjät käyttämässä verkkoa. Jos toinen käyttäjä on käyttämässä kanavaa, tiedonsiirto epäonnistuu ja yhteyttä pitää yrittää myöhemmin uudestaan. Nämä menetelmät ovat melko yksinkertaisia ja helppoja toteuttaa, mutta niillä ei useinkaan saada järjestelmän parasta mahdollista suorituskykyä. [15]

Kilpavaraukseen perustuvat kanavallepääsymenetelmät voivat olla melko tehokkaita, jos käyttäjiä on paljon ja tiedonsiirrontarve on luonteeltaan purskettaista. Tällaiset menetelmät eivät kuitenkaan takaa käyttäjälle tiettyä tiedonsiirtonopeutta. Ongelman ratkaisuksi on kehitetty pyyntöön perustuva kanavallepääsymenetelmä. Tämän menetelmän idea on jakaa käytössä olevaa kaistanleveyttä niille käyttäjille, jotka sitä tarvitsevat. Tarvitsijoiden kesken käytössä olevat radioresurssit voidaan jakaa esimerkiksi käyttäen aikajakoista kanavointia. Jos verkossa on käyttäjiä, jotka tarvitsevat ajoittain suurta tiedonsiirtonopeutta, mutta eivät koko aikaa, pyyntöön perustuva kanavointi saattaa olla tehokas vaihtoehto. [11]

Luotettava yhteys on tärkeää tietoliikenneyhteyksissä, sillä virheet voivat vaikeuttaa heikentävästi sovellusten käytettävyyteen. Eräs mahdollinen menetelmä bittivirheiden vähentämiseksi on uudelleenlähetysmenetelmä (ARQ, Automatic repeat request). Tämä menetelmä on varsin hyvä, jos käytettävä sovellus ei ole herkkä viiveille. Perinteiset ARQ-menetelmät kuitenkin lisäävät viivettä, joten erityisesti satelliittijärjestelmissä saattaa tiedonsiirtonopeus heikentyä merkittävästi niitä käytettäessä. Kuljetuskerroksella toimivalla TCP-protokolla käyttää valinnaista uudelleenlähetysmenetelmää (Selective ARQ). [14]

### 2.7.3 Kuljetuskerros

Kuljetuskerros huolehtii lopullisesti luotettavasta tiedonsiirtoyhteydestä lähettäjän ja vastaanottajan välillä sekä häivyttää alemmat kerrokset ylempien kerrosten näkyvistä. Lisäksi muun muassa ruuhkanhallinta kuuluu kuljetuskerroksen tehtäviin.

TCP-protokolla (Transmission Control Protocol) on yleisin kuljetuskerroksella toimivista protokollista. Sen avulla luodaan yhteys tietoverkkoon, ja se myös huolehtii tiedonsiirtoyhteyden luotettavuudesta. Satelliittiyhteyksissä TCP-protokollan suorituskyvyssä saattaa ilmetä ongelmia. Suurimmat ongelman aiheuttajat ovat pitkät etenemisviiveet ja ajoittain esiintyvät suuret bittivirhesuhteet. TCP-protokollassa suoritetaan uuden yhteyden alussa *Slow Start*-algoritmi. Slow start-menetelmällä kestää pitkien etenemisviiveiden vuoksi pitkään saavuttaa optimaalinen tiedonsiirtonopeus. Pitkät viiveet myös heikentävät siirtonopeuden kontrollin sekä törmäykse-

nestomenetelmien suorituskykyä, mikä heikentää järjestelmän tiedonsiirtonopeutta. [15] TCP:n suorituskyky on erityisen huono sen jälkeen kun järjestelmässä, jossa on pitkiä viiveitä, on vastaanottajalle saapunut useampia virheellisiä paketteja, koska ensimmäisen uudelleenlähetyksen jälkeen joudutaan odottamaan koko kiertoviive (RTT, Round-trip time) ennen kuin ilmoitetaan seuraavasta virheellisestä paketista. TCP-protokollassa voidaan käyttää erilaisia ruuhkanhallinta-algoritmeja ja satelliitiliikennettä ajatellen onkin kehitetty sille sopivia menetelmiä.

TCP-liikenteen nopeutta voidaan parantaa myös kiihdytyksellä. Kiihdytyksellä saadaan käyttöön suurempi osa satelliittilinkin kapasiteetista ja näin saavuttaa parempia tiedonsiirtonopeuksia. Tällaisia kiihdytysmenetelmiä ovat esimerkiksi XTP (Xpress Transport Protocol) ja SCPS (Space Communications Protocol Standards), joiden on todettu suoriutuvan hyvin geosynkroonisen radan satelliittien yhteyksissä. [16] SCPS:stä saatava hyöty perustuu muun muassa ikkunan koon skaalaukseen, minkä ansiosta suurempi määrä tavuja voidaan lähettää ennen kuin jäädään odottamaan vastaanottoilmoitusviestiä vastaanottajalta. Hyötyä saavutetaan TCP-otsikon pakkauksella sekä käyttämällä valinnaista kielteistä vastaanottoilmoitusviestiä (SNACK, Selective negative acknowledgment) virheellisinä vastaanotettujen pakettien uudelleenlähettämiseksi. [17]

Viiveen lisäksi ongelmia satelliittiverkoissa aiheuttaa ajoittain esiintyvä suurehko bittivirhesuhde. Bittivirhesuhde voi nousta hetkellisesti korkeaksi käytettävästä virheenkorjauksesta huolimatta. Suuret bittivirhesuhteet saattavat johtaa siihen, että TCP-lähettäjä pienentää tiedonsiirtonopeutta. TCP-protokolla ei pysty erottelemaan johtuuko virheily ruuhkasta tai hetkellisistä häiriöistä (esimerkiksi sateesta) etenemistiellä. Virheen sattuessa siis tiedonsiirtonopeutta voidaan pienentää, vaikka virheily johtuisi muusta kuin ruuhkasta. Tällaiset ongelmat saattavat pienentää tarpeettomasti järjestelmän suorituskykyä. [15] SCPS:ssä voidaan virheilyn tapahtuttua jättää tiedonsiirtonopeutta laskematta, jos oletetaan että virheily ei johdu ruuhkasta, toisin kuin käytettäessä TCP-protokollaa. [17] Jos satelliittilinkissä pitää käyttää salausta, kiihdytyksestä saatava hyöty on pienempi.

## 2.8 Kaupalliset Satelliittioperaattorit

Satelliittiverkkoihin liittymisessä ei tarvita välttämättä omaa satelliittia maata kiertävällä radalla vaan ne ovat pienempien yritysten ja organisaatioiden saavutettavissa kaupallisten satelliittioperaattorien avulla. Noin puolet geosynkroonisella radalla olevista kaupallisista satelliiteista ovat muutaman suurimman kaupallisen yhtiön omistamia ja operoimia, jotka tarjoavat palveluitaan myös pienemmille organisaatioille. Näitä suurimpia operaattoreita ovat esimerkiksi INTELSAT, SES, EUTELSAT. Tässä kappaleessa esitellään nämä operaattorit. [7]

### INTELSAT

Eräs mannertenvälisiä yhteyksiä tarjoava satelliittioperaattori on INTELSAT (International Telecommunications Satellite Consortium, myöhemmin International Telecommunications Satellite Organization). INTELSAT perustettiin vuonna 1964.



Alunperin kyseessä oli 11 valtion ja muutamien yritysten välinen yhteistyöprojekti. Ensimmäisen satelliitin INTELSAT lähetti avaruuteen jo vuonna 1965, kun ensimmäinen tietoliikennesatelliitti Early Bird (Intelsat 1) lähetettiin geosynkrooniselle radalle. Early Bird tarjosi televisio- ja puhelinpalveluita Pohjois-Amerikan ja Euroopan välillä. Vuonna 1974 jäsenmaiden lukumäärä oli noussut jo 86:een. Tuolloin INTELSAT:n palveluihin kuului muun muassa viisi televisiokanavaa sekä Valkoisen talon ja Kremlin välinen "kuuma linja".

Vuonna 1998 Intelsat astui askeleen kohti kaupallisuutta, kun useita Intelsatin satelliitteja siirrettiin uuden yrityksen New Skies Satellites hallintaan. Oltuaan 37 vuotta valtioiden välinen organisaatio Intelsat muutettiin yksityiseksi yritykseksi vuonna 2001. Nykyisin Intelsat on maailman suurin kaupallinen satelliittioperaattori, jonka hallinnassa on noin 50 tietoliikennesatelliittia. [18]



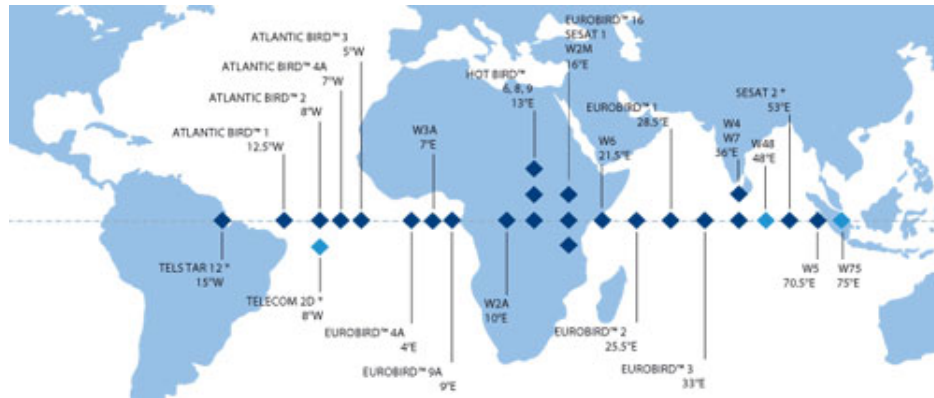
Kuva 9: Intelsatin hallinnassa olevat satelliitit [18]

## EUTELSAT

Eutelsat on vuonna 1977 perustettu yritys. Kuten Intelsatkin myös Eutelsat perustettiin alunperin hallitustenväliseksi organisaatioksi. Ensimmäisen satelliitin Eutelsat lähetti avaruuteen vuonna 1983. Eutelsat muutettiin vuonna 2001 yksityiseksi yritykseksi. Vuoden 2005 lopulla Eutelsatin markkinaosuus kiinteissä satelliittiyhteyksissä oli 14 %. Eutelsatin hallinnassa on geosynkroonisella radalla 26 satelliittia, joiden palvelualueet käsittävät kaksi kolmasosaa maapallon väestöstä. Yritys on tällä hetkellä maapallon kolmanneksi ja Euroopan suurin satelliittioperaattori. Kuvassa 10 on esitetty Eutelsatin hallinnassa olevat satelliitit geosynkroonisella radalla.

## SES

Vuonna 1985 perustettiin kaupallinen satelliittiyhtiö SES (Société Européenne de Satellites) Luxemburgissa. Ensimmäisen satelliittinsa SES sai avaruuteen vuonna 1985. Satelliitin nimi oli Astra 1A ja se kiersi maata geosynkroonisella radalla. SES kasvoi yhdeksi suurimmista satelliittioperaattoreista yrityskauppojen ansiosta.



Kuva 10: Eutelsatin hallinnassa olevat satelliitit [19]

Se hankki General Electriciltä Americom-nimisen operaattorin sekä INTELSAT:n myymän jo edellä mainitun New Skies Satellites-yrityksen. [7] SES ylläpitää tällä hetkellä yli 40:ä satelliittia, joiden palvelualue kattaa 99 % maapallon väestöstä. SES:n hallinnoimat satelliitit on esitetty kuvassa 11, jossa keltaisella on kuvattu SES:n hankkimien yritysten Americomin ja New Skies Satellitesin satelliitit sekä sinisellä SES:n Astra-satelliitit. [20]



Kuva 11: SES:n hallinnassa olevat satelliitit [20]

## 2.9 Yhteenveto

Tässä luvussa esiteltiin perustietoa satelliittitietoliikenteestä. Tietoliikennesatelliitit kiertävät maapalloa erilaisilla kiertoradoilla, joiden etäisyys maanpinnasta vaihtelee noin 200 kilometristä aina yli 35000 kilometriin. Geosynkroonisella radalla maata kiertävät satelliitit ovat noin 35000 km etäisyydellä maanpinnasta. Tällä radalla olevien satelliittien etu on, että ne pysyvät paikoillaan maanpinnalta katsottuna, joten

antennin suuntaaminen niitä kohden kertaalleen riittää. Geosynkroonisella radalla olevat satelliitit myös pystyvät tarjoamaan laajoja palvelualueita, mitkä ovat yksi satelliittitietoliikenteen eduista.

Satelliittipalveluissa käytetyt taajuuskaistat ja palvelut on jaotellut kansainvälinen televiestintäliitto (ITU). ITU on Yhdistyneiden Kansakuntien alainen järjestö, joka standardoi ja organisoi tietoliikennejärjestelmien käytäntöjä ja menetelmiä. ITU myös tarjoaa ilmastollista tilastotietoa, jonka avulla voidaan ottaa huomioon suunniteltavan radiolinkin ilmasto yhteyttä suunniteltaessa.

Satelliittilinkeissä pitkä etenemisviive tuo tiettyjä ongelmia tietoverkkoihin. Pitkien viiveiden vuoksi TCP-protokolla ei pysty käyttämään satelliittilinkin koko kapasiteettia. Tämän ongelman ratkaisuksi on kehitetty useita erilaisia menetelmiä. Pitkien etenemisviiveiden tuomia ongelmia voidaan muun muassa vähentää käyttämällä erilaisia kiihdytysmenetelmiä. Satelliittijärjestelmissä käytetään myös erilaisia koodausmenetelmiä. Koodausmenetelmissä lähetettävään signaaliin lisätään ylimääräisiä bittejä, joiden avulla vastaanottimeen saapuneesta signaalista voidaan löytää mahdolliset virheet ja korjata ne.

## 3 Satelliittilinkit

Satelliittiyhteyttä suunniteltaessa on tutkittava etenemistiellä tapahtuvia vaimennuksia. Vaimennusten lisäksi satelliittilinkkiin vaikuttaa myös muista radiojärjestelmistä yhteyttä häiritsevä interferenssi sekä kaikkia radioyhteyksiä häiritsevä kohina. Vaimennusten ja kohinan huomioon ottaminen linkin suunnittelussa on tärkeää, jotta linkin suorituskyky saadaan parhaaksi mahdolliseksi.

Tässä luvussa perehdytään satelliittilinkkien ominaisuuksiin. Kappaleessa 3.1 esitellään tärkeimmät signaalin etenemiseen vaikuttavat tekijät ja esitellään menetelmät vaimennuksien laskemiseen. Luvussa perehdytään myös kohinan ja interferenssin merkitykseen satelliittiyhteydessä kappaleessa 3.2 sekä esitellään yhteyksien mitoituksessa käytetty linkkibudjetti-laskelma kappaleessa 3.3.

### 3.1 Signaalin eteneminen

Tässä kappaleessa perehdytään signaalin vaimenemismalleihin. Kaikki käytetyt mallit perustuvat Kansainvälisen televiestintäliiton (ITU) suosituksiin. Taulukossa 3 on esitelty luvun laskuissa käytetyt ITU:n suositukset.

#### 3.1.1 Radiosäteen kaartuminen

Normaaleissa olosuhteissa ilman tiheys ja kosteus eivät ole vakioita maan ilmakehässä, vaan pienenevät ylöspäin mentäessä. Tämän vuoksi myös ilman taitekerroin pienenee korkeuden funktiona. Taitekertoimen muutos aiheuttaa radiosäteen taipumista kohti maata säteen kulkiessa maan ilmakehässä. Teoriassa säteen kaartuminen tulisi ottaa huomioon elevaatio- ja atsimuuttikulmia laskettaessa. Säteen kaartuminen on kuitenkin merkittävää ainoastaan alle 10 asteen kulmilla, joten tässä työssä säteen kaartumista ei oteta huomioon.

#### 3.1.2 Vapaan tilan vaimennus

Satelliittitietoliikennesyhteyksien vapaan tilan vaimennus esitellään ITU:n suosituksessa ITU-R P.525-2. Vapaan tilan vaimennus johtuu säteiden hajaantumisesta ja se on suoraan verrannollinen sekä taajuuteen että etäisyyteen. Vapaan tilan vaimennus siis kasvaa etäisyyden ja taajuuden kasvaessa. Se lasketaan kaavalla

$$A_v = 20 \log \left[ \frac{4\pi d}{\lambda} \right] \quad [\text{dB}] \quad (3.1)$$

missä  $d$  on satelliitin ja maa-aseman välinen etäisyys, ja  $\lambda$  signaalin aallonpituus.

#### 3.1.3 Sadevaimennus

Sadevaimennus on hyvin oleellinen osa satelliittitietoliikenteen vaimennusjakaumasta. Erityisesti suurilla taajuuksilla sadevaimennus kasvaa erittäin merkitykselliseksi. Sadevaimennuksen laskua kuvataan ITU:n suosituksissa ITU-R P.618-10 sekä

Taulukko 3: Esitellyt laskentamallit sekä niihin liittyvät suositukset

Laskettu muuttuja	ITU:n suositus
Vapaan tilan vaimennus	Recommendation ITU-R P.525-2, Calculation of free-space attenuation [21]
Sadekorkeus	Recommendation ITU-R P.839-3, Rain height model for prediction methods [22]
Sadevaimennukseen liittyvät vakiot $k$ ja $\alpha$	Recommendation ITU-R P.838-3 Specific attenuation model for rain for use in prediction methods [23]
Sadevaimennus	Recommendation ITU-R P.618-10, Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Earth-Space Telecommunication Systems [24]
Ilmakehän kaasuista aiheutuva vaimennus	Recommendation ITU-R P.676-8, Attenuation by Atmospheric Gases [25]
Pilvien ja sumun aiheuttama vaimennus	Recommendation ITU-R P.840-4, Attenuation due to Clouds and Fog [26]
Troposfäärin skintillaatio	Recommendation ITU-R P.618-10, Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Earth-Space Telecommunication Systems [24]
Ionosfäärin ilmiöt	Recommendation ITU-R P.531-10, Ionospheric Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Satellite Services and Systems [27]
Kokonaisvaimennus	Recommendation ITU-R P.618-10, Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Earth-Space Telecommunication Systems [24]

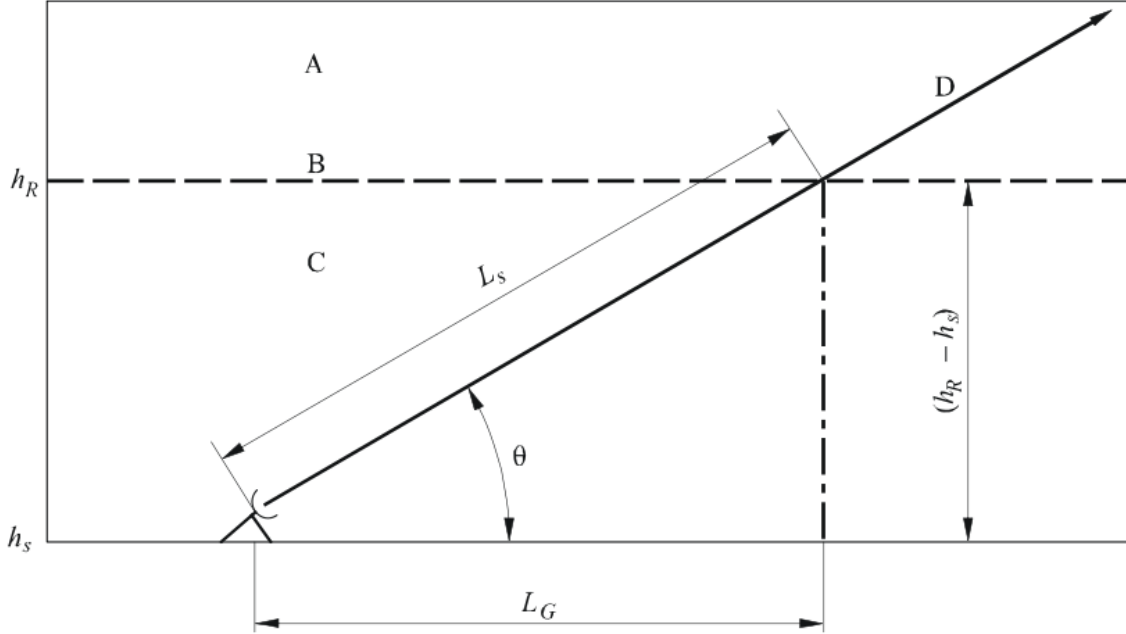
P.839-3. Sadevaimennuksen tilastollisen laskemiseen tarvitaan tietoa sadeintensiteetistä joka ylittyy 0.01 % ajasta, tieto maa-aseman paikasta leveyspiiri, pituuspiiri sekä korkeus merenpinnasta, elevaatiokulma sekä käytettävä taajuus. [24] Mikäli sadeintensiteetistä ei ole tarkempaa tietoa niin melko hyvä arvio voidaan laskea ITU-R:n tarjoamasta tilastotiedosta, joka perustuu Euroopan keskipitkien sääennusteiden keskuksen (ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecast) 40 vuoden ajalta mitattuihin keskiarvoihin. Tämä tilastotieto tarjotaan ITU-R:n internetsivulla 1.125 asteen tarkkuudella, josta voidaan laskea interpoloinnilla arvio sadeintensiteetistä koko maapallolle. ITU:n tarjoama 1.125 astetta tarkoittaa Suomessa pohjois-eteläsuunnassa 125 kilometriä ja itä-länsisuunnassa noin 60 kilometriä.

Sadevaimennuksen määrittelyssä tarvitaan tietoa sadekorkeudesta. ITU tarjoaa tilastotietoa 0°C:n isotermisestä korkeudesta, jonka avulla voidaan laskea sadekor-

keus kaavalla

$$h_r = h_0 + 0.36 \quad [\text{km}] \quad (3.2)$$

missä  $h_r$  on sadekorkeus ja  $h_0$  0°C:n isoterminen korkeus.[22] Kun sadekorkeus ja



Kuva 12: Sateen kaaviokuva. [24]

elevaatiokulma tiedetään, voidaan laskea signaalin sateessa kulkema matka

$$L_s = \frac{(h_r - h_s)}{\sin \theta} \quad [\text{km}] \quad (3.3)$$

Tosin jos  $h_r - h_s$  on pienempi tai yhtä suuri kuin nolla, sadevaimennusta ei tietenkään ole. Kuvassa 12 on esitetty sateen kaaviokuva, jossa on havainnollistettu sateen geometriaa.

Signaalin sateessa kulkeman matkan horisontaalinen projektio lasketaan kaavalla [24]

$$L_g = L_s \cos \theta \quad [\text{km}]. \quad (3.4)$$

Tämän jälkeen lasketaan polarisaatiosta ja taajuudesta riippuvat vakiot  $k$  ja  $\alpha$ .

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[ - \left( \frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k \quad (3.5)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[ - \left( \frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha \quad (3.6)$$

missä  $f$  on taajuus (GHz) sekä  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $c_j$ ,  $m_k$ ,  $c_k$ ,  $m_\alpha$  sekä  $c_\alpha$  ovat vakioita, jotka on taulukoitu suosituksessa P.838-3 erikseen vertikaaliselle ja horisontaaliselle polarisaatiolle. Muuttuja  $f$  on taajuus, jonka yksikkö ylläolevissa laskuissa on GHz. Mikäli käytössä oleva polarisaatio ei ole vertikaalinen tai horisontaalinen lasketaan vakiot  $k$  ja  $\alpha$

$$k = \frac{[k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos(2\tau)]}{2} \quad (3.7)$$

$$\alpha = \frac{[k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos(2\tau)]}{2k} \quad (3.8)$$

missä  $\tau$  on polarisaatiokulma, joka esimerkiksi ympyräpolarisaation tapauksessa olisi  $45^\circ$ . [23] Vakioiden  $k$  ja  $\alpha$  sekä paikkakohtaisen 0.01 % ajasta ylittävän sadeintensiteetin  $R_{0.01}$  avulla voidaan laskea sadevaimennus kilometriä kohden

$$\gamma_R = k(R_{0.01})^\alpha \quad [\text{dB/km}]. \quad (3.9)$$

Tämän jälkeen lasketaan horisontaalinen pelkistyskerroin (reduction factor)  $r_{0.01}$  0.01 %:lle ajasta

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0.38 (1 - e^{-2L_G})} \quad (3.10)$$

Vielä on laskettava vertikaalinen säätökerroin (vertical adjustment factor)  $\nu_{0.01}$  0.01 %:lle ajasta

$$\zeta = \tan^{-1} \left( \frac{h_R - h_s}{L_G r_{0.01}} \right) \quad [\text{astetta}] \quad (3.11)$$

sekä

$$L_R = \begin{cases} \frac{L_G r_{0.01}}{\cos \theta} & [\text{km}], \quad \zeta > \theta \\ \frac{h_R - h_s}{\sin \theta} & [\text{km}], \quad \zeta \leq \theta \end{cases} \quad (3.12)$$

Vertikaalisen säätökertoimen laskemiseen tarvitaan vielä apumuuttujaa  $\chi$ , joka saadaan kaavoista

$$\chi = \begin{cases} 36 - |\varphi| & [\text{astetta}] \\ 0 & [\text{astetta}] \end{cases} \quad (3.13)$$

Minkä jälkeen voidaan laskea

$$\nu_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left( 31 (1 - e^{-(\theta/(1+\chi))}) \frac{\sqrt{L_R \gamma_R}}{f^2} - 0.45 \right)} \quad (3.14)$$

jonka avulla tehokkaaksi siirtotien pituudeksi (effective path length) voidaan laskea

$$L_E = L_R \nu_{0.01} \quad [\text{km}] \quad (3.15)$$

Viimein sateen aiheuttamaksi vaimennukseksi 0.01 % ajasta saadaan

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E \quad [\text{dB}] \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned}
\text{Jos } P \geq 1\% \text{ tai } |\varphi| \geq 36^\circ: & \quad \beta = 0 \\
\text{Jos } P < 1\% \text{ ja } |\varphi| < 36^\circ \text{ ja } \theta \geq 25^\circ: & \quad \beta = -0.005(|\varphi| - 36) \\
\text{Muulloin:} & \quad \beta = -0.005(|\varphi| - 36) + 1.8 - 4.25 \sin(\theta)
\end{aligned}$$

Mikäli halutaan tietää sateen aiheuttama vaimennus todennäköisyydellä  $P$ , mikä on erisuuri kuin 0.01 %, joudutaan ensin määrittelemään

minkä avulla saadaan

$$A_{sade}(P) = A_{0.01} \left( \frac{P}{0.01} \right)^{-(0.655+0.033 \ln(P)-0.045 \ln(A_{0.01})-\beta(1-P) \sin \theta)} \quad [\text{dB}] \quad (3.17)$$

Sadevaimennusta laskettaessa on hyvä muistaa, että olosuhteet saattaavat vaihdella paljonkin vuosittain, joten yksittäisten vuosien mittauksiin perustuvat laskelmat vuosittaisesta sadevaimennuksesta voivat vaihdella paljonkin ennustetuista tuloksista. [24]

### 3.1.4 Ilmakehän kaasuista aiheutuva vaimennus

ITU-R tarjoaa suosituksessaan Rec. ITU-R P.676-8 mallin ilmakehän kaasujen aiheuttamaan vaimennuksen laskemiseksi. Suosituksessa esitetään kaksi tapaa vaimennuksen laskuun, joista ensimmäinen on monimutkaisempi ja pätee 1000 GHz:n taajuuteen asti. Toinen tapa vaimennuksen laskuun on yksinkertaisempi kuin edellinen, ja sen luvataan antavan riittävän tarkkoja tuloksia 350 GHz:n taajuuteen asti, joten sen tarkkuus on riittävä tämän työn puitteissa. Tässä työssä tarkastellaan alle 50 GHz:n taajuuksia.

Suosituksessa P.676-8 kuivan ilman aiheuttama vaimennus  $\gamma_o$  (dB/km) lasketaan alle 54 GHz:n taajuudelle kaavalla

$$\gamma_o = \left[ \frac{7.2r_t^{2.8}}{f^2 + 0.34r_p^2r_t^{1.6}} + \frac{0.62\zeta_3}{(54 - f)^{1.16\zeta_1} + 0.83\zeta_2} \right] f^2 r_p^2 \cdot 10^{-3} \quad (3.18)$$

missä tuntemattomat muuttujat  $\zeta_1$ ,  $\zeta_2$  sekä  $\zeta_3$  saadaan laskettua määrittelemällä ensin funktio

$$\varphi(r_p; r_t; a; b; c; d) = r_p^a r_t^b \exp[c(1 - r_p) + d(1 - r_t)] \quad (3.19)$$

minkä avulla muuttujat saadaan

$$\zeta_1 = \varphi(r_p; r_t; 0.0717; -1.8132; 0.0156; -1.6515) \quad (3.20)$$

$$\zeta_2 = \varphi(r_p; r_t; 0.5146; -4.6368; 0.1921; -5.7416) \quad (3.21)$$

$$\zeta_3 = \varphi(r_p; r_t; 0.3414; -6.5851; 0.2130; -8.5854) \quad (3.22)$$



missä puolestaan

$$r_p = p/1013 \quad (3.23)$$

$$r_t = 288/(273 + t) \quad (3.24)$$

Edellisissä  $p$  on paine (hPa),  $t$  lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ ) ja  $f$ , kuten edelläkin, taajuus (GHz). Kuivan ilman korkeus puolestaan lasketaan

$$h_k = \frac{6.1}{1 + 0.17r_p^{-1.1}}(1 + t_1 + t_2 + t_3) \quad [\text{km}] \quad (3.25)$$

missä

$$t_1 = \frac{4.64}{1 + 0.066r_p^{-2.3}} \exp \left[ - \left( \frac{f - 59.7}{2.87 + 12.4 \exp(-7.9r_p)} \right)^2 \right] \quad (3.26)$$

$$t_2 = \frac{0.14 \exp(2.12r_p)}{(f - 118.75)^2 + 0.031 \exp(2.2r_p)} \quad (3.27)$$

$$t_3 = \frac{0.014}{1 + 0.14r_p^{-2.6}} f \frac{-0.0247 + 0.0001f + 1.61 \cdot 10^{-6}f^2}{1 - 0.0169f + 4.1 \cdot 10^{-5}f^2 + 3.2 \cdot 10^{-7}f^3} \quad (3.28)$$

sillä rajoituksella, että

$$h_k \leq 10.7r_p^{0.3} \quad (3.29)$$

kun  $f < 70 \text{ GHz}$ . Nyt voidaan laskea kohtisuoraan maanpintaa kohden etenevän signaalin vaimeneminen yksinkertaisesti

$$A_o = \gamma_o h_k \quad [\text{dB}] \quad (3.30)$$

Kuivan ilman lisäksi myös vesihöyryn aiheuttama vaimennus tulee ottaa huomioon. Se puolestaan lasketaan kaavalla

$$\begin{aligned} \gamma_w = & \left[ \frac{3.98\eta_1 \exp[2.23(1 - r_t)]}{(f - 22.235)^2 + 9.42\eta_1^2} g(f, 22) + \frac{11.96\eta_1 \exp[0.7(1 - r_t)]}{(f - 183.31)^2 + 11.14\eta_1^2} \right. \\ & + \frac{0.081\eta_1 \exp[6.44(1 - r_t)]}{(f - 321.226)^2 + 6.29\eta_1^2} + \frac{3.66\eta_1 \exp[1.6(1 - r_t)]}{(f - 325.153)^2 + 9.22\eta_1^2} \\ & + \frac{25.37\eta_1 \exp[1.09(1 - r_t)]}{(f - 380)^2} + \frac{17.4\eta_1 \exp[1.46(1 - r_t)]}{(f - 448)^2} \\ & + \frac{844.6\eta_1 \exp[0.17(1 - r_t)]}{(f - 557)^2} g(f, 557) + \frac{290\eta_1 \exp[0.4(1 - r_t)]}{(f - 752)^2} g(f, 752) \\ & \left. + \frac{8.3328 \cdot 10^4 \eta_2 \exp[0.99(1 - r_t)]}{(f - 1780)^2} g(f, 1780) \right] f^2 r_t^{2.5} \rho \cdot 10^{-4} \end{aligned} \quad (3.31)$$

missä muuttujat  $\eta_1$  ja  $\eta_2$  on määritelty

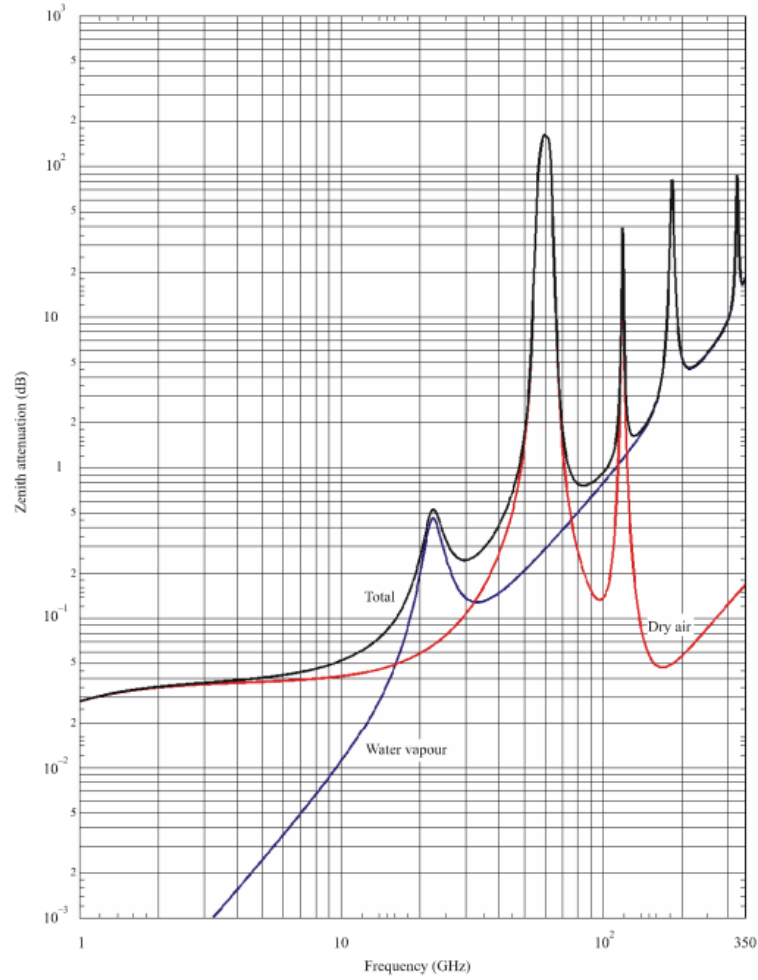
$$\eta_1 = 0.955r_p r_t^{0.68} + 0.006\rho \quad (3.32)$$

$$\eta_2 = 0.735r_p r_t^{0.5} + 0.0353r_t^4 \rho \quad (3.33)$$

sekä kaavassa 3.31 käytetty funktio  $g(f, f_i)$

$$g(f, f_i) = 1 + \left( \frac{f - f_i}{f + f_i} \right)^2 \quad (3.34)$$

Kuvassa 13 on esitetty vesihöyryn ja kuivan ilman aiheuttama vaimennus taajuuden funktiona. Vesihöyryn aiheuttama tilastollinen kokonaisvaimennus voidaan



Kuva 13: Kaasujen aiheuttama vaimennus taajuuden funktiona. [25]

laskea käytetyn elevaatiokulman  $\theta$  sekä ITU:n tilastoiman integroidun vesimäärän  $V_t(P)$  avulla

$$A_w(f, \theta, P) = \frac{0.0173V_t(P)}{\sin \theta} \frac{\gamma_w(f, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})} \quad [\text{dB}] \quad (3.35)$$

missä:

$P$	:	Todennäköisyys
$f$	:	Taajuus (GHz)
$\theta$	:	Elevaatiokulma (yhtälö pätee, kun $\theta \geq 5^\circ$ )
$f_{ref}$	=	20.6 (GHz)
$p_{ref}$	=	780 (hPa)
$\rho_{v,ref}$	=	$\frac{V_t(P)}{4} (g/m^3)$
$t_{ref}$	=	$14 \ln \left( \frac{0.22V_t(P)}{4} \right) + 3(^{\circ}C)$
$V_t(P)$	:	Integroitu vesihöyryn määrä joka ylittyy $P\%$ ajasta
$\gamma_w(f, p, \rho, t)$	:	Vesihöyryn vaimennus, joka voidaan laskea kaavalla 3.31
$\rho$	:	Vesihöyryn tiheys

Sen jälkeen kun  $A_w$  ja  $A_o$  tunnetaan, voidaan ilmakehän kaasujen aiheuttama kokonaisvaimennus laskea kaavalla [25]

$$A_k(P) = \frac{A_o}{\sin \theta} + A_w(P)^1 \quad [\text{dB}] \quad (3.36)$$

### 3.1.5 Pilvet ja sumu

Laskentamenetelmät pilvien ja sumun aiheuttamaan vaimennukseen esitetään ITU:n suosituksessa ITU-R P.840-4. Kuten ilmakehän kaasujen sekä sateen vaimennukset, myös pilvien ja sumun aiheuttama vaimennus voidaan laskea ITU:n suosituksessa todennäköisyyden funktiona. Lähtötietoina pilvien aiheuttamaa vaimennusta laskettaessa tarvitaan pilvien sisältämän vesimassan määrä todennäköisyyden funktiona. ITU:n tutkimusryhmä 3 julkaisee tilastotietoa vesimassan määrästä paikan funktiona, joten pilvien aiheuttaman vaimennuksen laskemiseksi tarvitaan luonnollisesti myös maa-aseman paikan leveys- ja pituuspiirit. Sumun aiheuttama vaimennus on erittäin pieni alle 100 GHz:n taajuuksilla, joten sumu ei aiheuta merkittävää vaimennusta tämän työn kannalta kiinnostavilla taajuuksilla. Sumun aiheuttama vaimennus jätetään siis huomioimatta laskuissa.

Pilvet koostuvat pienistä, halkaisijaltaan korkeintaan 0.01 cm:n vesipisaroista. Ensin tulee laskea pilven ominaisvaimennus  $K_l[(\text{dB/km})/(\text{g/m}^3)]$ . Pilven ominaisvaimennuksen laskussa voidaan käyttää Rayleigh sirontaan perustuvaa matemaattista mallia, joka käyttää kaksois-Debye mallia veden dielektriselle permittiivisyydelle

$$K_l = \frac{0.819f}{\epsilon''(1 + \eta^2)} \quad [(\text{dB/km})/(\text{g/m}^3)] \quad (3.37)$$

---

<sup>1</sup>Tämä lauseke on suosituksessa ITU-R Rec. P.676-8 virheellinen  $A_k(P) = \frac{A_o + A_w(P)}{\sin \theta}$ . Yhtälö on virheellinen, koska elevaatiokulma otetaan huomioon jo vesihöyryn vaimennuksen yhtälössä 3.35, joten vesihöyryn vaimennuksessa ei enää tule ottaa huomioon elevaatiokulmaa. Asiasta on oltu yhteydessä ITU-R:n tutkimusryhmä 3:een (SG3, Study Group 3), joka on vastuussa signaalitienemistä koskevista suosituksista, ja se keskustelee mahdollisista korjauksista suositukseen P.676-8 seuraavassa kokouksessaan marraskuussa 2010.

missä  $f$  on taajuus ja  $\eta$  voidaan laskea kaavalla

$$\eta = \frac{2 + \epsilon'}{\epsilon''} \quad (3.38)$$

missä  $\epsilon'$  ja  $\epsilon''$  ovat veden dielektrinen permittiivisyyden kompleksiset kertoimet, jotka saadaan kaavoista

$$\epsilon''(f) = \frac{f(\epsilon_0 - \epsilon_1)}{f_p [1 + (f/f_p)^2]} + \frac{f(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{f_s [1 + (f/f_s)^2]} \quad (3.39)$$

$$\epsilon'(f) = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_1}{[1 + (f/f_p)^2]} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{[1 + (f/f_s)^2]} + \epsilon_2 \quad (3.40)$$

missä puolestaan:

$$\epsilon_0 = 77.7 + 103.3(\theta - 1) \quad (3.41)$$

$$\epsilon_1 = 5.48 \quad (3.42)$$

$$\epsilon_2 = 3.51 \quad (3.43)$$

$$\theta = 300/T \quad (3.44)$$

missä  $T$  on lämpötila Kelvineissä. Edellä käytetyt relaksaatio taajuudet  $f_p$  ja  $f_s$  voidaan laskea kaavoilla

$$f_p = 20.09 - 142(\theta - 1) + 294(\theta - 1)^2 [\text{GHz}] \quad (3.45)$$

$$f_s = 590 - 1500(\theta - 1) [\text{GHz}] \quad (3.46)$$

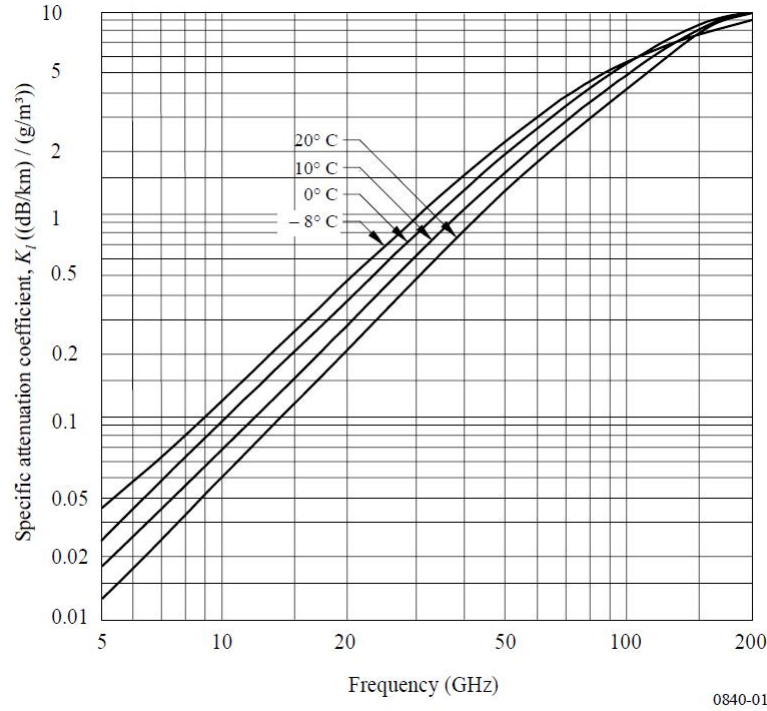
Kuvassa 14 on esitetty pilvien aiheuttama ominaisvaimennus taajuuden funktiona eri lämpötiloilla. Pilvien aiheuttaman kokonaisvaimennuksen tarvitaan ominaisvaimennuksen lisäksi pystysuora nesteen määrä pilvessä, jonka yksikkö on  $(\text{kg}/\text{m}^2)$ . Pilvien vaimennus voidaan laskea kaavalla

$$A_{\text{Pilvet}} = \frac{LK_l}{\sin(\theta)} \quad [\text{dB}] \quad \text{kun} \quad 5^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \quad (3.47)$$

missä  $\theta$  on elevaatiokulma. [26]

### 3.1.6 Troposfäärin skintillaatio

Tässä työssä on käytetty ITU:n suosituksen ITU-R P.618-10 tapaa laskea troposfäärin skintillaation aiheuttama vaimennus. Skintillaatio tarkoittaa ilmakehän lämpötila- ja ilmanpaine-eroista johtuvaa radioaallon taittumista. Ilmiö on tuttu myös tähti-taivaalta, jossa tähdistä tuleva valo tuikkii. ITU:n laskumalli antaa oikeita tuloksia satelliittilinkeille, joissa käytetään yli neljän asteen elevaatiokulmaa. Mallia on testattu 7 ja 14 GHz:n taajuuksilla, mutta sen luvataan pätevän ainakin 20 GHz:iin asti.



Kuva 14: Pilvien aiheuttama vaimennus taajuuden funktiona [26]

Troposfäärin skintillaation aiheuttaman vaimennuksen laskemisessa tarvitaan tieto keskimääräisestä lämpötilasta ja kosteusprosentista. Jollei näistä ole tietoa, voidaan käyttää näistä riippuvaa kostean ilman radiosignaalin taittumista kuvaavaa termiä  $N_{wet}$ , joka saadaan ITU:n tutkimusryhmä 3:n tarjoamasta tietokannasta [28].  $N_{wet}$ :n avulla voidaan laskea signaalin amplitudin standardipoikkeama

$$\sigma_{ref} = 3.6 \cdot 10^{-3} + 10^{-4} \cdot N_{wet} \quad [\text{dB}] \quad (3.48)$$

Signaalin kulkema matka  $L_s$  ratkaistaan kaavalla

$$L_s = \frac{2h_L}{\sqrt{\sin^2(\theta) + 2.35 \cdot 10^{-4} + \sin(\theta)}} \quad [\text{m}] \quad (3.49)$$

missä  $\theta$  on elevaatiokulma ja  $h_L$  on pyörteisen kerroksen korkeus, jolla käytetään arvoa 1000 m. Antennin tehokas halkaisija  $D_{eff}$  lasketaan puolestaan

$$D_{eff} = \sqrt{\eta} D \quad [\text{m}] \quad (3.50)$$

missä  $D$  on antennin fyysinen halkaisija ja  $\eta$  antennin hyötysuhde. Jollei antennin hyötysuhdetta tiedetä, voidaan käyttää arvoa 0.5, mikä on tavallisesti melko hyvä arvio. Antennin keskiarvoistamistekijä saadaan kaavalla

$$g(x) = \sqrt{3.86(x^2 + 1)^{11/12} \cdot \sin \left[ \frac{11}{6} \arctan \frac{1}{x} \right] - 7.08x^{5/6}} \quad (3.51)$$

missä

$$x = 1.22D_{eff}^2(f/L_s) \quad (3.52)$$

missä  $f$  on kantoaallon taajuus (GHz). Jos kaavan 3.51 neliöjuuri on negatiivinen, skintillaatiovaimennuksen suuruus on aina nolla eikä seuraavia laskuja tarvitse enää tehdä. Signaalin standardipoikkeama etenemistiellä

$$\sigma = \sigma_{ref} f^{7/12} \frac{g(x)}{(\sin \theta)^{1.2}} \quad (3.53)$$

Tämän jälkeen lasketaan todennäköisyystekijä, joka riippuu ainoastaan todennäköisyydestä  $P$ , jolla vaimennus halutaan laskea. Yhtälö pätee todennäköisyyksillä  $0.01 < P \leq 50$

$$a(P) = -0.061(\log_{10} P)^3 + 0.072(\log_{10} P)^2 - 1.71 \log_{10} P + 3.0 \quad (3.54)$$

Skintillaation aiheuttamaksi vaimennukseksi saadaan lopulta

$$A_{skin}(P) = a(P) \cdot \sigma \quad [\text{dB}] \quad (3.55)$$

missä vastauksen yksikkönä on desibelit. Saatava arvo on siis vaimennus, joka ylittyy  $P$  % ajasta. [24]

### 3.1.7 Ionosfäärin ilmiöt

Ionosfääri on ilmakehän ylin kerros, joka alkaa noin 50 km korkeudesta ja ulottuu aina 2000 km korkeuteen asti. Ionosfääri on lisäksi jaettu D-, E-, ja F-alueisiin. Ionosfääri on ionisoituneen plasman alue. Auringosta tuleva sähkömagneettinen säteily ionisoi ilmassa olevia hiukkasia. Ionisaation määrä on verrannollinen sähkömagneettisen säteilyn matkasta ilmakehän läpi, joten ionisaatio on tiheämpää päiväntasaajan lähellä suuremmasta tulokulmasta johtuen. Ionisaatio on riippuvainen vuorokauden ajasta, vuodenajasta sekä auringon aktiivisuudesta. Ionosfäärissä tapahtuvien ilmiöiden arviointiin ITU tarjoaa suosituksen asiakirjassa ITU-R P.531-10. Tyypillisesti ionosfäärin ilmiöt ovat huomattavia matalilla taajuuksilla, ja niiden merkitys pienenee huomattavasti käytettävän taajuuden kasvaessa. Täten ionosfäärin ilmiöillä ei ole suurta merkitystä satelliittitietoliikenteen korkeammilla taajuuksilla. Signaalin etenemisen kannalta merkittävimmät ionosfäärissä tapahtuvat ilmiöt ovat Faraday-kiertyminen, ryhmäviive, skintillaatio sekä dispersio. [4]

Oleellinen lukuarvo ionosfääri-ilmiöiden mallintamisessa on elektronien kokonaislukumäärä (TEC, Total Electron Content). TEC on määritelty elektronien kokonaislukumääräksi neliömetrillä ( $N_T$ ) siirtotiellä  $s$ . Se pystytään ratkaisemaan integroimalla elektronitiheys siirtotien yli

$$N_T = \int_s n_e(s) ds \quad (3.56)$$

missä  $n_e(s)$  on elektronien tiheys ( $\text{el}/\text{m}^3$ ). Vaikka signaalin kulkema siirtotie tunnettaisiinkin tarkalleen, on elektronien kokonaislukumäärä usein vaikea tarkasti laskea, sillä elektronien tiheys on riippuvainen vuorokaudenajasta, vuodenajasta sekä auringon aktiivisuudesta.

**Ionosfäärin skintillaatio** tarkoittaa radioaallon nopeita amplitudin ja vaiheen vaihteluita, jotka aiheuttaa elektronitiheyden vaihtelu ionosfäärissä. Ionosfäärin skintillaatiota on tutkittu radiolinkeillä 30 MHz:stä 7 GHz:iin. Skintillaatio voi erityisesti matalilla taajuuksilla aiheuttaa vakavia ongelmia tietoliikennejärjestelmälle.

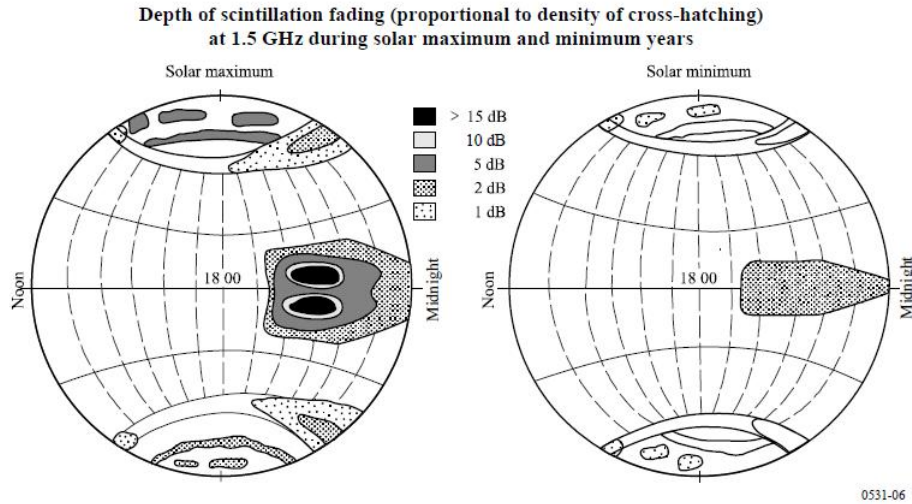
Skintillaatioindeksiä käytetään ilmaisemaan ionosfääriskintillaation aiheuttamaa huipusta huippuun vaihtelua

$$S_4 = \left( \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} \right)^{1/2} \quad (3.57)$$

missä merkintä  $\langle \rangle$  tarkoittaa muuttujan keskiarvoa ja  $I$  signaaliampplitudia. Skintillaatioindikaattori liittyy amplitudin huipusta - huippuun vaihteluun. Skintillaatioindeksi  $S_4$ :lle voidaan laskea arvio, mikäli tunnetaan huipusta-huippuun vaihtelu  $P_{p-p}$

$$S_4 \cong P_{p-p}^{0.794} \quad (3.58)$$

Eniten ionosfäärin skintillaatiosta kärsii maapallon napa-alueet sekä päiväntasaajan läheinen alue. Kuvassa 15 on kuvattu ionosfäärin skintillaatiolle herkäät alueet auringon korkean (vasemman puoleinen maapallo) ja matalan (oikean puoleinen maapallo) aktiivisuuden aikoina. [3]



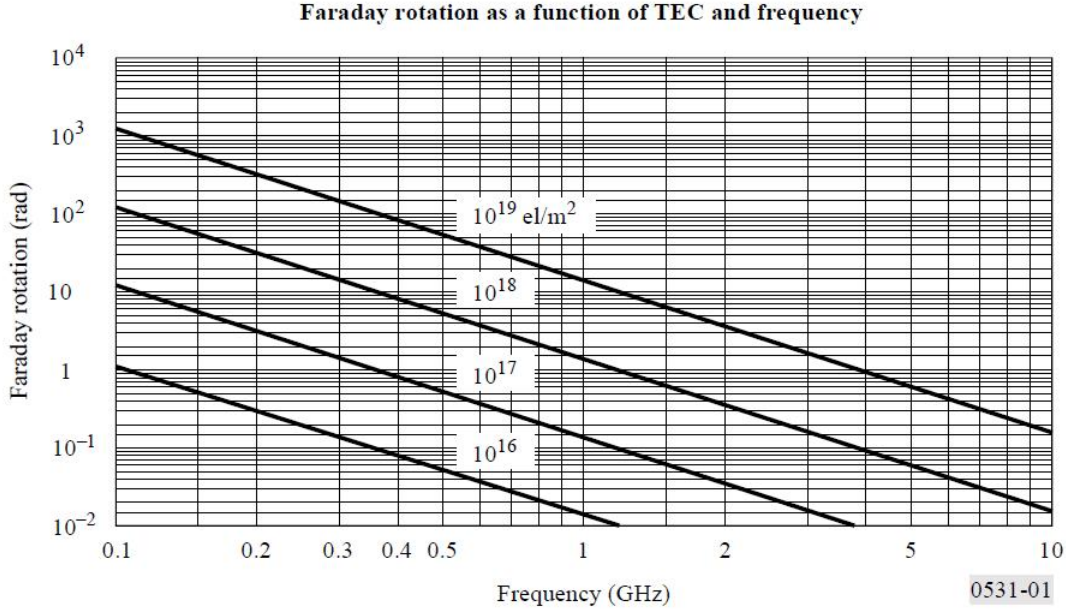
Kuva 15: Ionosfäärin aiheuttama huipusta-huippuun heilahtelu [27]

**Polarisaation kiertymistä** aiheutuu radioaallon vuorovaikutuksesta ionosfäärin elektronien kanssa. Tätä ilmiötä kutsutaan usein myös Faraday kiertymäksi. Ongelmia satelliittiyhteydelle polarisaation kiertyminen aiheuttaa erityisesti VHF-taajuuksilla toimiville järjestelmille, jotka käyttävät lineaarista polarisaatiota. Polarisaatiotason kiertymistä tapahtuu, kun aallon kaksi kiertyvää komponenttia etenee ionosfäärin läpi eri nopeuksilla.

Kiertymän kulma  $\theta_F$  riippuu käytettävästä taajuudesta, magneettikentän voimakkuudesta sekä elektronien kokonaislukumäärästä.

$$\theta_F = 236 B_{av} N_T f^{-2} \quad (3.59)$$

missä  $B_{av}$  on keskimääräinen magneettikentän voimakkuus,  $f$  käytettävä taajuus ja  $N_T$  elektronien kokonaislukumäärä. Kuvassa 16 on esitetty polarisaation kiertyminen taajuuden funktiona  $N_T$ -arvoilla  $10^{16}$ :sta  $10^{19} \text{ el}/m^2$ . Magneettikentän keskimääräisenä voimakkuutena on pidetty arvoa  $5 \cdot 10^{21} \text{ Wb}/m^2$



Kuva 16: Faraday kiertyminen taajuuden funktiona [27]

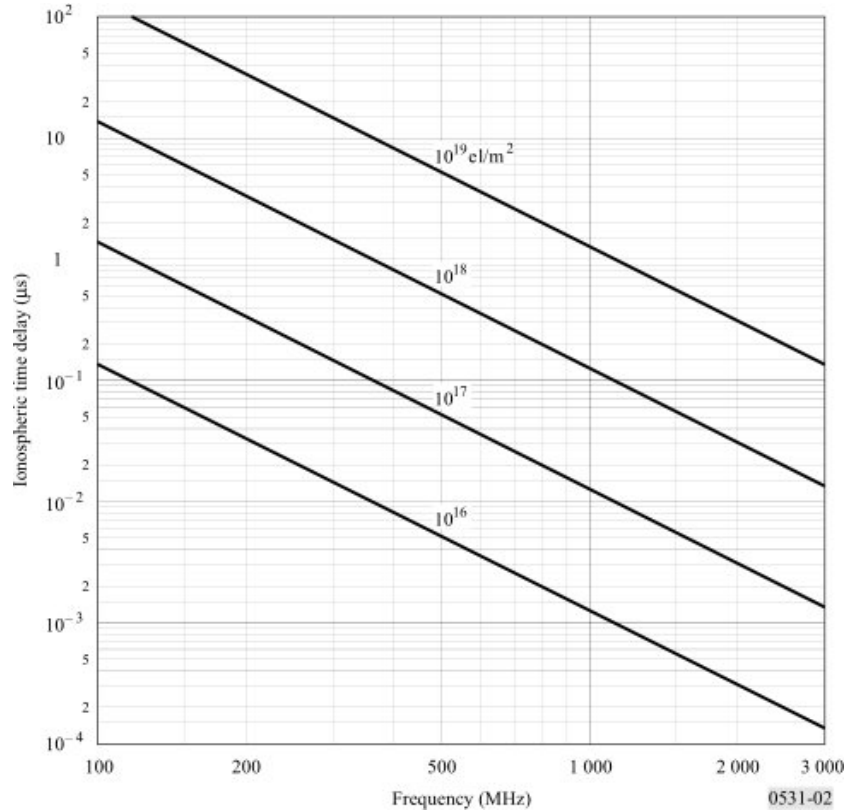
Keskimääräinen polarisaation kiertyminen käyttäytyy melko vakaasti ja ennaltavarmuudella, joten sitä voidaan helposti manuaalisesti kompensoida. Ajoittain kuitenkin geomagneettiset myrskyt voivat aiheuttaa polarisaation muutoksen, jota on erittäin hankala ennustaa. Polarisaation kiertyminen on kuitenkin merkittävimmillään päiväntasaajalla, joten se ei ole kovinkaan merkityksellinen Suomen leveyspiireillä.

**Ryhmäviive** tarkoittaa radioaallon etenemisnopeuden pienenemistä, joka johtuu etenemistiellä olevista vapaista elektroneista. Tämä ilmiö saattaa aiheuttaa ongelmia esimerkiksi satelliittinavigaatiojärjestelmissä, joissa etenemisaika on tärkeä olla laskettavissa. Etenemisviive voidaan laskea kaavalla

$$t_d = 1.345 \frac{N_T}{f^2} \cdot 10^{-7} \quad (3.60)$$

missä  $N_T$  on elektronien kokonaismäärä yksikkönä  $\text{el}/m^2$  ja  $f$  käytettävä taajuus yksikkönä Hz. Kuvassa 17 on esitetty ryhmäviive taajuuden funktiona elektronien eri kokonaismäärillä. [27]





Kuva 17: Ryhmäviive taajuuden funktiona [27]

**Dispersiolla** tarkoitetaan kaistanleveyden ylä- ja alataajuuksien ryhmäviiveiden erotusta. Dispersio on merkitsevää ainoastaan kun järjestelmä käyttää suurta kaistanleveyttä, jolloin ala- ja ylätaajuuksien ero on merkittävä. Dispersio voidaan laskea kaavalla

$$|\Phi_t| = \frac{2.68 \cdot 10^{-7}}{f^3} df \cdot N_T(s) \quad (3.61)$$

missä  $df$  on kaistanleveys. Kaistanleveyden ääripäiden viiveiden erotus riippuu siis kaistanleveyden lisäksi elektronien kokonaismäärästä sekä taajuuden kuutiosta. [4]

### 3.1.8 Sulamiskerros

Laaja-alaisissa sateissa ilmakehässä oleva kosteus tiivistyy jääkiteiksi, jotka kasvetuaan riittävän suuriksi tippuvat alaspäin. Näiden lumihitaleiden pudottua  $0^\circ\text{C}$ :n korkeustason alapuolelle, ne alkavat sulaa vesipisaroiksi. Tätä korkeutta, jossa lumihitaleet sulavat vesipisaroiksi kutsutaan sulamiskerrokseksi. Mikäli putoavat jääkiteet eivät ehdi sulaa vedeksi, sataa räntää. Tyypillisesti sulamiskerroksen paksuus on muutamia satoja metrejä. [4] Sulamiskerroksen vaikutusta ei ole otettu huomioon tässä työssä. Tähän ratkaisuun päädyttiin, sillä sulamiskerroksen aiheuttama vaimennus on pieni verrattuna sateen aiheuttamaan vaimennukseen. Lisäksi sulamiskerroksen esiintymisen todennäköisyys suuri-intensiteetisessä sateessa on pieni.

### 3.1.9 Antennin suuntaamishäviöt

Satelliitin antennien lähetyskeilojen suuntaamishäviöille on vaikeaa laskea tarkkaa lukuarvoa. Footprint- eli palvelualuekarttojen avulla voidaan kuitenkin tehdä jonkinlainen arvio suuntaamishäviön lukuarvosta, mutta se on hyvin summittainen. Erityisesti Ku-kaistalla ja sitä suuremmilla taajuuksilla antennien keilat ovat niin kapeita, että suuntaamishäviöiden merkitys korostuu. Suurin osa Suomesta käytettävistä satelliiteista on suunnattu Keski- tai Länsi-Eurooppaan, joten tavallisesti suuntaamishäviöt ovat Etelä-Suomessa pohjoisempia sijoituspaikkoja pienemmät.

### 3.1.10 Kokonaisvaimennuksen laskeminen

Kokonaisvaimennuksen laskemiseen tietyllä todennäköisyydellä  $P$  käytetään kaavaa

$$A_{TOT}(P) = A_{Kaasut}(P) + \sqrt{(A_{Sade}(P) + A_{Pilvet}(P))^2 + A_{Skin}^2(P)} \quad (3.62)$$

Kaavaa suositellaan käytettäväksi erityisesti yli 18 GHz:n taajuuksilla sekä matalilla korotuskulmilla. On todettu, että erittäin pienillä todennäköisyyksillä kaava (3.62) antaa liian suuria arvoja. Paremmin oikeisiin lukuarvoihin päästään käyttämällä

$$A_{pilvet}(P) = A_{pilvet}(1\%) \quad , \text{ kun } P < 1.0\% \quad (3.63)$$

$$A_{kaasut}(P) = A_{kaasut}(1\%) \quad , \text{ kun } P < 1.0\% \quad (3.64)$$

Osasyynä tähän on, että sadevaimennuksen laskentamenetelmä on osittain empiirinen, joten osittain vesihöyryn ja pilvien vaimennusta otetaan huomioon jo sadevaimennuksessa. [24]

Tässä luvussa esitelty ITU:n vaimennusmenetelmät on todettu vastaavan hyvin tehtyjä mittauksissa [24]. Pienillä todennäköisyyksillä (0.001 % - 1 %) menetelmän on todettu antavan noin 35 % virheen vaimennuksen neliöllisessä keskiarvossa verrattaessa ITU-R:n suosituksen P.311, joka on ITU:n mittausten ja sille raportoitujen mittausten tietokanta. Verrattaessa pidempiin useamman vuoden mittaisiin mittauksiin virhe vaimennuksen neliöllisessä keskiarvossa on 25 %. [24]

## 3.2 Kohina ja interferenssi

Kohinaa esiintyy aina tietoliikenneyhteyksissä. Siirtotiestä järjestelmään kytkeytyvät kohinalähteet voidaan luokitella kahteen luokkaan: luonnolliseen kohinaan ja ihmisen tuottamaan kohinaan (man-made noise). Luonnollinen kohina saattaa syntyä joko maanpäällisistä lähteistä kuten salamoinnista, ilmakehän kaasusta ja sateesta, tai maapallon ulkopuolisista lähteistä kuten kosmisesta taustasäteilystä tai aurin gon, kuun tai muun taivaankappaleen aiheuttamasta kohinasta. Ihmisen aiheuttamaa kohinaa syntyy muun muassa sähkölinjoista ja muiden viestijärjestelmien (tattomasta) säteilystä. [3]

## Kohina radiojärjestelmissä

Maa-aseman havainnoima kohinalämpötila tietystä suunnasta ilmakehän läpi saadaan säteilysiirtoteoriasta (radiative transfer theory).

$$t_b = \int_0^\infty t_m \gamma e^{-\tau} dl + t_\infty e^{-\tau_\infty} \quad (3.65)$$

missä  $t_m$  on ympäristön lämpötila,  $\gamma$  imeytymiskerroin ja  $\tau$  tutkittavan kohdan optinen syvyys. Voidaan myös ilmaista, että

$$\tau = 4.343 \cdot A \quad (3.66)$$

missä  $A$  on signaalin vaimeneminen etenemistiellä desibeleinä.

Isotermisessä ilmakehässä ( $t_m$  on vakio) kaava (3.65) muuntuu muotoon

$$t_b = t_m (1 - e^\tau) \quad (3.67)$$

$$t_b = t_m \left(1 - 10^{-\frac{A}{10}}\right) \quad [\text{K}] \quad (3.68)$$

missä puolestaan termi  $t_b$  vaihtelee välillä 260:sta 280:en Kelviniä. Termille  $t_m$  on johdettu kaava

$$t_m = 1.12t_s - 50 \quad [\text{K}] \quad (3.69)$$

missä  $t_s$  on pinnan lämpötila Kelvineissä.

Tietoliikennejärjestelmissä kohina ilmoitetaan tavallisesti ekvivalenttina kohinalämpötilana  $t_a$ , jonka yksikkö on Kelvin tai kohinakertoimen  $F_a$ , jonka yksikkö on desibeli.

$$F_a(\text{dB}) = 10 \log \left( \frac{t_a}{t_0} \right) \quad (3.70)$$

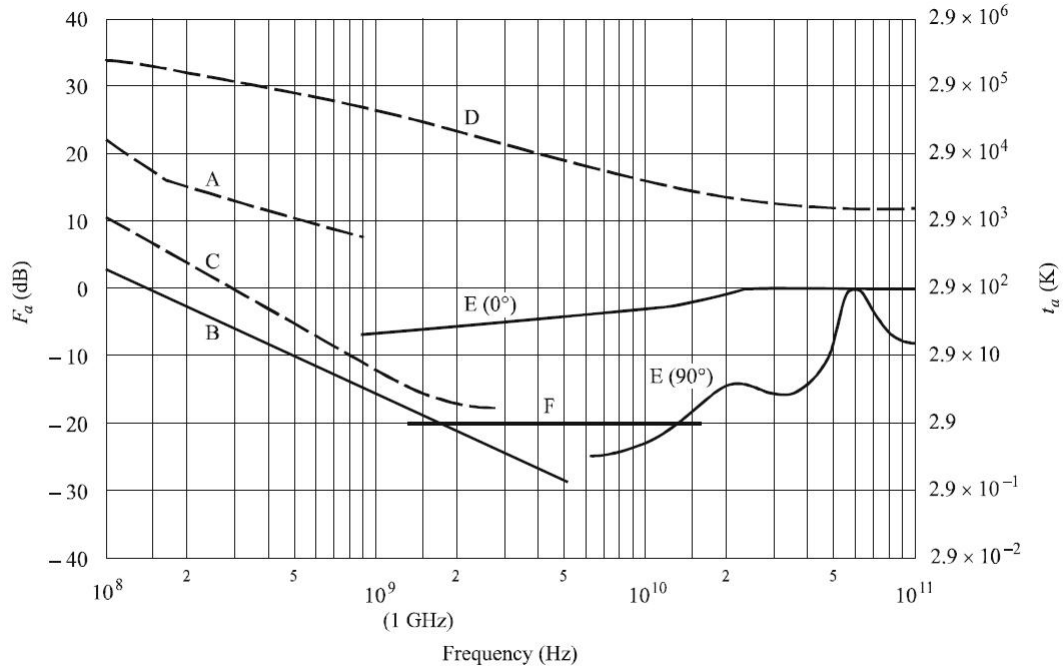
missä  $t_0$  ympäristön referenssilämpötila, joka tavallisesti asetetaan 290 K:ksi. Kohinakerroin voidaan myös laskea

$$F_a(\text{dB}) = 10 \log \left( \frac{p_a}{k t_0 b} \right) \quad (3.71)$$

missä  $p_A$  on kohinateho antennissa,  $k$  Boltzmannin vakio ja  $b$  vastaanottavan järjestelmän kohinan kaistanleveys.

Kuvassa 18 on esitetty kohinalähteitä taajuuden funktiona. Kohinatasot on kuvattu sekä kohinalämpötilalla (oikea akseli) että kohinaluvulla (vasen akseli). Kuvasta nähdään, että tämän työn kannalta kiinnostavimmilla alueilla suurimpia kohinan aiheuttajia ovat ilmakehän kaasut. Auringon aiheuttama kohina on selkeästi ilmakehän kaasujen aiheuttamaa kohinaa suurempi, mutta aurinko aiheuttaa haittaa järjestelmälle ainoastaan ollessaan suoraan satelliitin takana. Auringon aiheuttama kohina haittaa tietoliikenneyhteyksiä kaksi kertaa vuodessa kevät- ja syyspääväntasauksien yhteydessä. Tuolloin aurinko katkaisee päivittäin parin viikon ajan tietoliikenneyhteyden noin 20 minuutiksi kerrallaan. Katkoajat ja -päivät voi laskea tarkasti jo etukäteen esimerkiksi ilmaisten Internet-ohjelmien avulla [29]. Mikäli

maa-asemassa käytetään suurempaa antennia, jollaista voidaan joutua käyttämään pohjoisemmilla paikkakunnilla kompensoimaan ilmakehän aiheuttamaa vaimennusta, auringon aiheuttama kohina maa-aseman antenniin kasvaa [30]. Sen sijaan kosminen taustasäteily on niin pientä, että se ei juuri häiritse satelliittiyhteyksiä.



Kuva 18: Kohinalähteitä taajuuden funktiona

A: Ihmisen tuottama kohina

B: Linnunradan kohina

C: Linnunradan kohina (kohti linnunradan keskustaa äärettömän kapealla kaistalla)

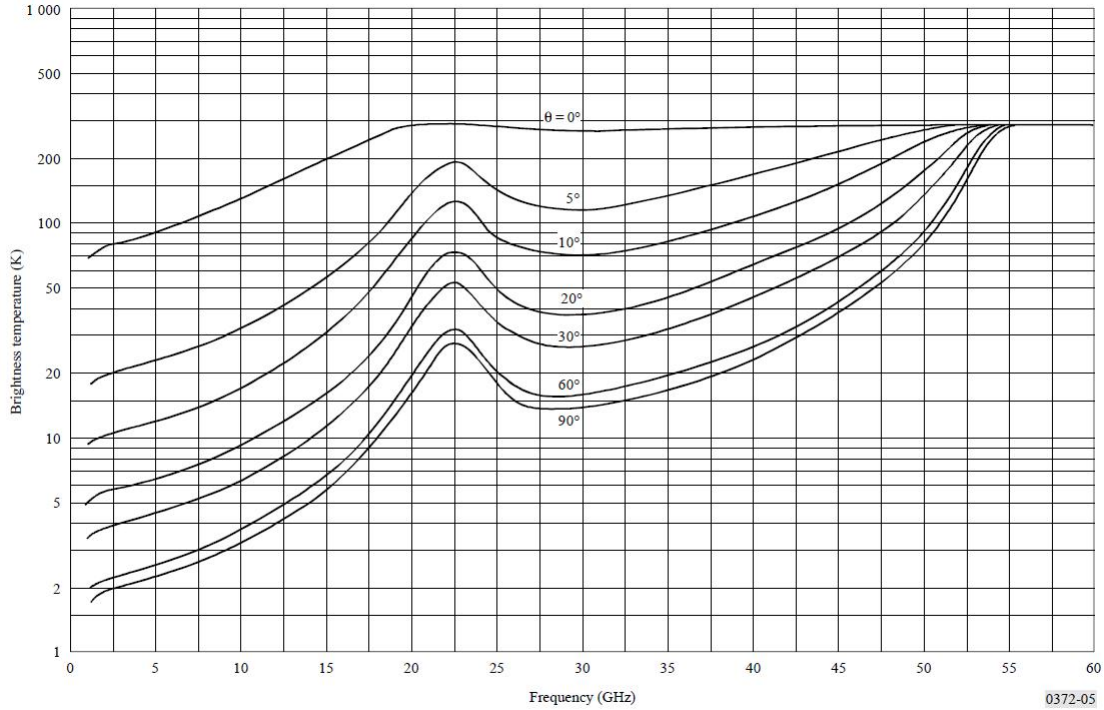
D: "Hiljainen" aurinko

E: Hapesta ja vesihöyrystä johtuva taivaan kohina (ylempi käyrä 0 asteen elevaatiokulmalla, alempi käyrä 90 asteen elevaatiokulmalla)

F: Mustan kappaleen säteily (2.7K) [31]

### Ilmakehän kaasusta, sateesta ja pilvistä johtuva kohina

Signaalin edetessä ilmakehässä ilmakehän kaasujen aiheuttaman vaimennuksen lisäksi ilmakehän kaasut lisäävät signaaliin termistä kohinaa. Satelliittitietoliikenteelle merkittävimmät ilmakehän kaasut ovat happi ja vesihöyry. Kuvassa 19 on esitetty kirkkaan taivaan kohinalämpötila taajuuden funktiona eri elevaatiokulmille. Kuvasta nähdään, että järjestelmään kytkeytyvä kohina kasvaa elevaatiokulman pienentyessä. Kuvan käyrät perustuvat laskelmiin, joissa on käytetty vesihöyryn tiheytenä  $7,5 \text{ g/m}^3$ , maanpinnan lämpötilana  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  sekä ilmanpaineena  $1023 \text{ mb}$ . Näitä arvoja pidetään keskimääräisinä ilmakehän ominaisuuksina. Kosmista säteilyä tai muita maan ulkopuolisia kohinalähteitä ei ole otettu huomioon.



Kuva 19: Ilmakehän kohinalämpötila kirkkaan sään olosuhteissa eri elevaatiokulmilla. Vesihöyryn tiheys  $7.5 \text{ g/m}^3$ , Lämpötila  $10^\circ\text{C}$ , ilmanpaine  $1023 \text{ mb}$  ja  $\theta$  elevaatiokulma. [31]

Myös sade sekä pilvet lisäävät tietoliikenneyhteyden kohinaa. Sekä sateen että pilvien aiheuttama lisäys järjestelmän kohinaan voidaan laskea näiden aiheuttaman vaimennuksen avulla

$$t_{r,p} = t_m \left( 1 - 10^{-\frac{A_{r,p}}{10}} \right) \quad (3.72)$$

Missä  $t_m$  on sateen tapauksessa  $260 \text{ K}$  ja pilvien aiheuttamaa kohinaa laskettaessa  $280 \text{ K}$  sekä  $A_{r,p}$  sateen tai pilvien aiheuttama vaimennus. [24]

### Maapallon ulkopuolinen kohina

Maan ulkopuolisen kohinan lähteitä ovat aurinko, kuu, kosminen taustakohina sekä galaktinen kohina. Nämä kohinalähteet vaikuttavat sekä nousevan että laskevan siirtosuunnan yhteyksiin ja kohinan vaikutus järjestelmään riippuu muun muassa käytettävästä taajuudesta. [31]

### Interferenssi

Satelliittiyhteyteen interferenssiä syntyy viereisiltä (adjacent channel), samalta (co-channel) ja ristikkäiseltä (cross-channel) kanavalta sekä viereisestä järjestelmästä (adjacent system). Viereisten kanavien interferenssi syntyy nousevan siirtosuunnan tapauksessa saman järjestelmän muista maa-asemista. Laskevalla siirtosuunnalla sen sijaan viereisten kanavien interferenssi syntyy ei-vastaanottavalle maa-asemalle, joka

on satelliitin lähetysantennin samassa keilassa (same spot beam) kuin varsinainen vastaanottava maa-asema.

Saman kanavan interferenssi syntyy laskevalle siirtosuunnalle, kun satelliitin lähettämän häiritsevän signaalin kantoaallon taajuus ja polarisaatio ovat samat kuin hyödyllisen kantoaallon taajuus ja polarisaatio. Nousevassa siirtosuunnassa saman kanavan interferenssi syntyy satelliitin vastaanottimelle maa-aseman kantoaallostaa, joka käyttää samaa polarisaatiota ja taajuutta kuin hyötysignaalin maa-asema. Häirintää aiheuttava maa-asema on eri antennikeilassa, mikäli käytetään FDMA- tai TDMA-kanavointia. Jos käytetään CDMA-kanavointia, maa-asemat voivat olla samassa antennikeilassa.

Ristikkäisten kanavien interferenssi syntyy nousevaan siirtosuuntaan, kun samaa taajuutta, mutta eri polarisaatiota käyttävät maa-asemat ovat eri satelliitin vastaanottoantennin keiloissa mikäli käytetään yhtä polarisaatiota. Käytettäessä kaksoispolarisaatiota ristikkäisten kanavien interferenssiä syntyy, jos maa-asemat sijaitsevat vastaanottoantennin samassa keilassa. Laskevan siirtosuunnan tapauksessa tätä interferenssiä synnyttää kantoaalto, joka toimii samassa järjestelmässä, samalla taajuudella, mutta eri polarisaatiolla kuin käytettävä kantoaalto.

Vierekkäisten järjestelmien interferenssi syntyy muista radiojärjestelmistä. Nousevassa siirtosuunnassa kyseistä interferenssiä syntyy muista satelliittijärjestelmistä, jotka käyttävät samaa taajuutta ja polarisaatiota kuin interferenssistä kärsivä järjestelmä. Laskevassa siirtosuunnassa vierekkäisten järjestelmien interferenssiä syntyy satelliittijärjestelmien lisäksi myös maanpäällisistä radiojärjestelmistä, jotka tulee ottaa huomioon käytettäessä matalia elevaatiokulmia. [32]

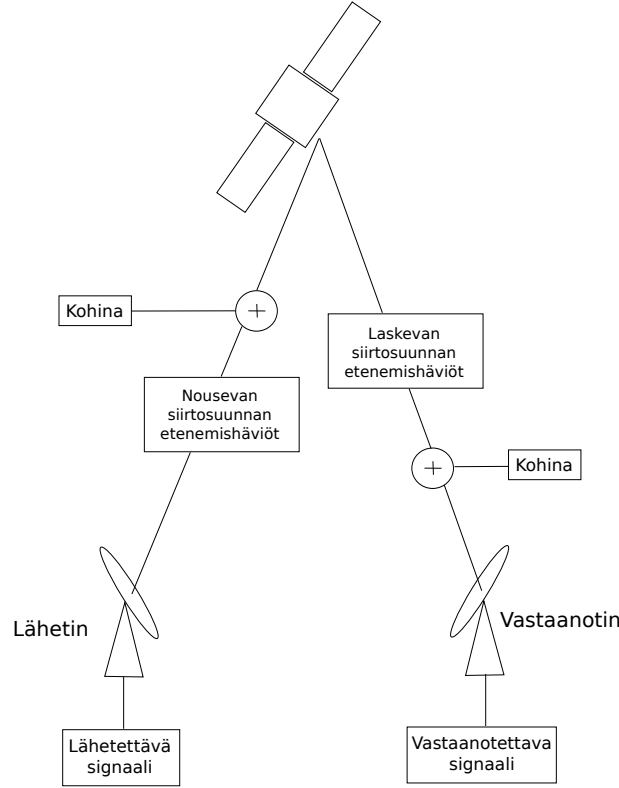
Depolarisaatioksi kutsutaan ilmakehän ilmiöistä johtuvaa polarisaation muutosta. Ristipolarisaatiolla sen sijaa tarkoitetaan depolarisaatiosta aiheutuvaa kahden eri signaalin välistä häiriötä. [4]. Depolarisaatiota aiheuttaa pääasiallisesti sade, monitie-eteneminen sekä ilmakehässä olevat jääkiteet. Sade- ja jääpolarisaatio voivat olla ongelmallisia erityisesti järjestelmille, jotka toimivat yli 12 GHz:n taajuuksilla ja joissa käytetään taajuuden uudelleenkäyttöä erottelemalla kaksi hyötysignaalia käyttämällä kahta erilaista polarisaatiota. Myös monitie-etenemisessä tapahtuu depolarisaatiota. Monitie-etenemistä, ja siitä johtuvaa depolarisaatiota, tapahtuu kuitenkin ainoastaan alle viiden asteen elevaatiokulmilla. [3] ITU esittää laskentamallin depolarisaatiolle suosituksessa ITU-R P.618-10. Depolarisaatiota on hyvä tutkia, mikäli pohditaan mahdollisuutta käyttää taajuuden uudelleenkäyttöä järjestelmässä.

### 3.3 Linkkibudjetti

Satelliittiyhteyden suorituskykyä voidaan arvioida linkkibudjettilaskuilla. Linkkibudjettilaskuilla voidaan myös mitoittaa satelliittilinkin lähetysteho. Tyypillinen satelliittiyhteys on kuvattu kuvassa 20.

Lähetysteho ilmoitetaan tavallisesti parametrilla *EIRP* (Effective Isotropic Radiated Power), joka voidaan laskea lähetysantennin vahvistuksen ja lähetystehon tulona. *EIRP* ilmaistaan tavallisesti desibelivatteina, jolloin se lasketaan kaavalla

$$EIRP[\text{dBW}] = 10 \log(P_t G_t) \quad (3.73)$$



Kuva 20: Tyypillinen satelliittilinkki

missä  $P_t$  on lähetysteho watteina ja  $G_t$  lähetysantennin vahvistus. Muun muassa  $EIRP$ -arvoa tarvitaan kantoaalto-kohinasuhteen  $C/N_0$  laskemiseen

$$C/N_0[\text{dB}] = EIRP(\text{dBW}) + \frac{G}{T} \left[ \frac{\text{dB}}{\text{K}} \right] - A_{tot}[\text{dB}] + 228.6 \left[ \frac{\text{dB}}{\text{K} \cdot \text{Hz}} \right] \quad (3.74)$$

Vakio 228.6 on Boltzmannin vakio ilmaistuna desibeleinä ja  $A_{tot}$  kokonaisvaimennus. Muuttuja  $G/T$  on hyvyysluku, joka on vastaanottimesta riippuva termi. Hyvyysluvusta ilmoitetaan tyypillisesti vastaanottimen tuote-esitteessä mitattu arvo kirkkaan taivaan olosuhteissa. Tavallinen arvo Ku-kaistalla on noin 25 dB/K. Muun muassa vastaanottoantennin vahvistus, vastaanottimen kohinakerroin sekä käytettävä taajuuskaista vaikuttavat hyvyyslukuun. Jos siirtotiellä sataa tai on pilviä, jotka lisäävät kohinaa, otetaan kohinan kasvu huomioon hyvyysluvussa.

Joissain tapauksissa, erityisesti digitaalisissa tiedonsiirtojärjestelmissä, kantoaalto-kohinasuhdetta useammin käytetty termi kuvaamaan järjestelmän suorituskykyä on bittienergiakohinasuhde  $E_b/N_0$ . Bittienergia-kohinasuhde voidaan laskea kantoaalto-kohinasuhteen ja tiedonsiirtonopeuden avulla

$$\frac{E_b}{N_0} [\text{dB}] = \frac{C}{N_0} [\text{dB}] - R_b[\text{bps} \quad \text{dB}] \quad (3.75)$$

missä  $R_b$  on tiedonsiirtonopeus. Molemmat termeistä  $E_b/N_O$  sekä  $C/N_O$  käyttäytyvät samoin eli mitä suurempi suhde saadaan sitä parempi tiedonsiirtoyhteys on. Bittienenergia-kohina suhteesta voidaan laskea yhteyden bittivirhesuhde (BER, Bit Error Ratio), joka riippuu käytettävästä modulaatiotekniikasta. Satelliittitiedonsiirtolinkeissä tavoitteena usein on saada bittivirhesuhteeksi korkeintaan  $10^{-6}$ :ksi, jolla linkki tavallisesti vielä toimii melko hyvin. Monimutkaiset modulaatiotekniikat vaativat toimiakseen suuremman bittienenergia-kohina-suhteen, jotta saadaan riittävän hyvä bittivirhesuhde tietoliikennelinkille. Monimutkaisemmilla modulaatioilla saadaan kuitenkin suurempia tiedonsiirtonopeuksia. On tärkeää, että signaalin etenemistien vaimennukset minimoidaan, sillä jo desibelin kasvu kokonaisvaimennuksessa saattaa merkitä merkittävästi huonompaa tiedonsiirtonopeutta.

### 3.4 Yhteenveto

Satelliittiyhteyden suunnittelussa on tärkeä ymmärtää ilmakehänilmiöiden vaikutus signaalin etenemiseen. Suurin vaimenemissyys on vapaan tilan vaimeneminen, joka on riippuvainen satelliittimaa-aseman ja satelliitin välisestä etäisyydestä ja käytettävästä taajuudesta. Vapaan tilan etenemisen lisäksi signaalia vaimentaa myös muun muassa sade, pilvet, sekä ilmakehän kaasut. ITU tarjoaa eri vaimennussyiden suuruuden laskemiseen suosituksia, joita käytetään tämän työn laskelmissa.

Vaimennusten lisäksi satelliittiyhteyttä suunniteltaessa on myös otettava huomioon satelliittiyhteyteen kytkeytyvä kohina ja interferenssi. Maanpäällisistä radiolaitteista interferenssi saattaa häiritä satelliittilinkkiä, jos käytetään erittäin matalia elevaatiokulmia. Muuten interferenssiä syntyy pääasiassa muista satelliittijärjestelmistä. Kohina häiritsee aina tietoliikenneyhteyksiä. Kohinaa voi tulla satelliittilinkiin useasta lähteestä. Muun muassa maapallo on kohinalähde. Pienillä elevaatiokulmilla maapallon kohina häiritseekin yhteyttä enemmän kuin suurilla kulmilla. Maapallon ulkopuolisista kohinalähteistä merkittävin on aurinko, joka joutuessaan vastaanottimen antennin keilaan häiritsee merkittävästi tietoliikenneyhteyttä. Ihmisen aiheuttamaa kohinaa esiintyy pääsääntöisesti ainoastaan alle 1 GHz:n taajuuksilla. Signaalin kohinaa lisää myös etenemistiellä olevat pilvet ja sade, jotka tulee ottaa huomioon yhteyttä suunniteltaessa.

Linkkibudjettianalyysi on menetelmä satelliittiyhteyden mitoitukseen. Kyseisellä menetelmällä voidaan myös arvioida satelliittiyhteyden suorituskkyä. Linkkibudjetti on melko yksinkertainen laskutoimitus, jossa yhteyden lähetysteho ja vahvistukset summataan ja niistä vähennetään vaimennukset. Laskutoimituksen tuloksena saadaan selville yhteyden kantoaaltokohinasuhde. Myös kohina otetaan huomioon linkkibudjetissa. Kun satelliittiyhteyttä suunnitellaan hyväksytään tavallisesti, että yhteys katkeaa lyhyeksi ajaksi aika ajoin. Tyypillisesti satelliittilinkin suunnittelun lähtökohtana on, että linkin on toimittava 99.99% ajasta.



## 4 Maa-aseman paikanvalinnan vaikutus yhteyden laatuun

Tässä luvussa esitellään satelliittimaa-aseman paikan valintaa. Ensin esitellään maa-aseman paikanvalinnan kriteereitä kappaleessa 4.1. Kappaleessa 4.2 esitetään työn yhteydessä tehty SELC-työkalu, jonka avulla voidaan vertailla eri paikkojen soveltuvuutta satelliittimaa-asemalle. Luvussa 5 tehtävät laskut on tehty SELC-työkalulla.

### 4.1 Maa-aseman paikanvalinnan kriteereitä

Satelliittimaa-aseman paikkaa valittaessa tulee valita paikka, jossa vaimennukset etenemistiellä ovat mahdollisimman pienet. Jo alle desibelin ero kokonaisvaimennuksessa saattaa merkittävästi heikentää saavutettavaa tiedonsiirtonopeutta.

Kolme ensisijaisesti maa-aseman paikanvalintaan vaikuttavaa tekijää ovat

- Näköyhteys satelliittiin
- Linkkibudjetti
- Interferenssi

Satelliittimaa-asemalta on oltava kaikissa satelliittijärjestelmissä ja taajuuskaistoilla näköyhteys käytettävään satelliittiin. Mikäli tiedetään satelliitti jota halutaan käyttää, voidaan määrittää maa-aseman elevaatio- ja atsimuuttikulma. Näiden kulmien avulla suunnitellun maa-aseman paikalla voidaan tarkistaa, ettei satelliitin edessä ole näköesteitä kuten esimerkiksi rakennuksia, mäkiä tai puita. Mikäli on mahdollista, että tulevaisuudessa maa-asema tulee käyttämään myös muita kuin jotain tiettyä satelliittia, tulee maa-aseman paikanvalinnassa ottaa huomioon myös laajemmassa mittakaavassa suunnitellun maa-aseman paikan läheisyydessä olevat esteet geosynkrooniselle radalle. Usein radiojärjestelmien suunnittelussa varmistetaan, että radiolinkin ensimmäisellä Fresnellin vyöhykkeellä ei ole esteitä. Fresnellin vyöhykkeen koko on melko pieni lähettimen ja vastaanottimen lähellä sekä suurimmillaan radiolinkin puolivälissä. Ensimmäisen Fresnellin vyöhykkeen koko on kääntäen verrannollinen käytettävään taajuuteen. Koska satelliittilinkeissä yhteysväli on erittäin suuri, mahdolliset esteet esiintyvät yhteysväliin suhteutettuna erittäin lähellä maa-asemaa, jolloin ensimmäisen Fresnellin vyöhykkeen koko on erittäin pieni. Riittääkin siis, että varmistetaan että maa-asemalta on näköyhteys satelliitille.

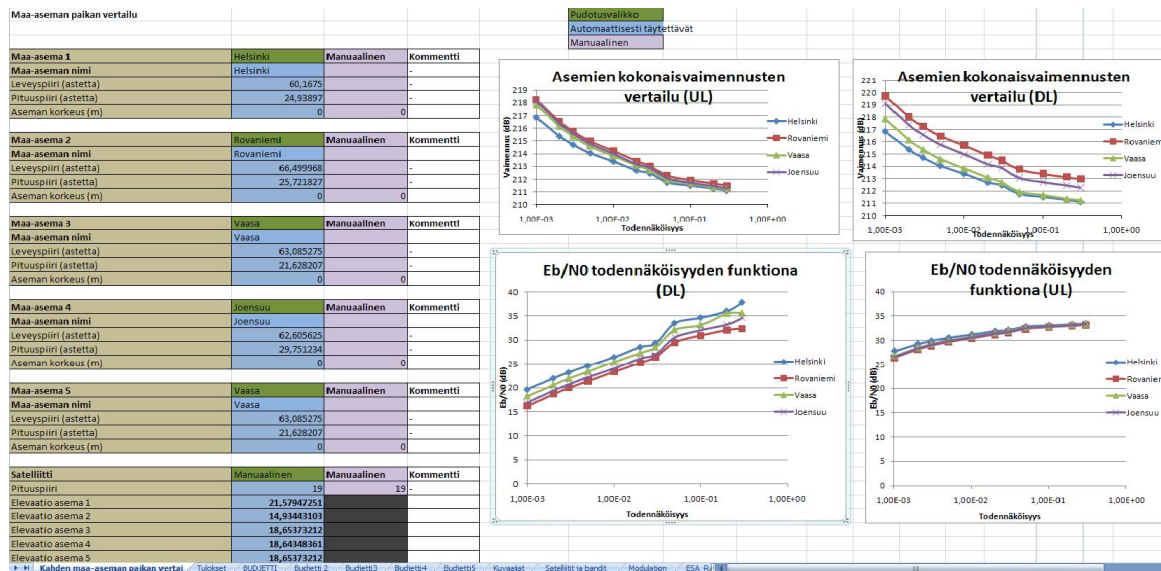
Linkkibudjettilaskuilla voidaan tehdä laskelmia millaiseen suoritussykyyn satelliittimaa-asema pystyy. Vertailtaessa linkkibudjetin tai kokonaisvaimennuksen tuloksia voidaan tehdä päätelmiä miltä maa-asemalta on fyysisesti parhaimmat mahdollisuudet olla yhteydessä tiettyyn satelliittiin. Tärkeä ominaisuus satelliittilinkissä on elevaatiokulma. Matalilla elevaatiokulmilla signaali nimittäin etenee pidemmän matkan maan ilmakehässä, jolloin se on pidempään altis ilmakehän vaimennukselle ja näin kärsii niistä enemmän kuin suurempien elevaatiokulmien satelliittilinkit.

Satelliittimaa-aseman suunnittelussa pitää ottaa huomioon myös interferenssi. Erityisesti erittäin matalilla elevaatiokulmilla sekä C-kaistalla maanpäälliset radioverkot voivat häiritä satelliittiyhteyttä. Paras vaihtoehto olisi sijoittaa maa-asema

paikkaan, jossa ei ole häiritseviä signaaleja. Tavallisesti ei kuitenkaan ole mahdollista tai ainakaan käytännöllistä sijoittaa maa-asemaa kovin kauas kaupungista, joten antennin suuntauksessa on oltava erityisen huolellinen. [8]

## 4.2 SELC-työkalu

Maa-aseman paikan ominaisuuksien laskemiseen tehtiin tämän työn yhteydessä Excel-työkalu, jonka avulla voidaan suorittaa linkkibudjettilasku satelliittilinkille. Työkalu nimettiin SELC-työkaluksi (Satellite Earth-Station Location Comparison). SELC-työkalu on tehty Microsoft Excel 2007 -ohjelmalla. SELC-työkalulle kerrotaan suunniteltujen maa-asemien paikkojen koordinaatit, tietoa satelliittilinkistä sekä käytössä olevasta laitteistosta. Tuloksena käyttäjä saa tietoa syöttämiensä paikkakuntien soveltuvuudesta satelliittimaa-aseman paikaksi. Saatavia tuloksia ovat kokonaisvaimennus, kantoaaltokohinasuhde ja bittienenergiakohinasuhde todennäköisyyden funktiona. Kuvassa 21 on esitetty SELC-työkalun käyttöliittymä.



Kuva 21: SELC-ohjelma

### 4.2.1 Ohjelmalle annettavat lähtöarvot

Käyttäjän tulee ensin antaa ohjelmalle vertailtavien satelliittimaa-asemien koordinaatit. Ohjelmaan on syötetty valmiiksi muutamien kaupunkien koordinaatteja. Jos käyttäjä kuitenkin haluaa tutkia jonkun muun paikan soveltuvuutta satelliittimaa-asemaksi, hän voi valita pudotusvalikosta vaihtoehdon 'Manuaalinen' ja antaa 'Manuaalinen' -kenttiin paikan leveys- ja pituuspiirit. Käyttäjä voi myös antaa satelliittimaa-aseman korkeuden merenpinnasta, jos se on tiedossa. Manuaalisessa tilassa maa-aseman leveyspiiri ilmoitetaan ohjelmalle välillä  $[-90, 90]$  astetta ja pituuspiiri niin ikään asteissa, mutta välillä  $[0, 360]$  itäistä pituutta. Koordinaattien lisäksi käyttäjä voi myös antaa maa-asemalle nimen. Nimi esiintyy ohjelman esittämissä

tuloksissa, jolloin tulosten luku on helpompaa. Kuvassa 22 on kuvattu suurin osa parametreista, jotka käyttäjä voi työkalulle antaa saadakseen mahdollisimman tarkat tulokset.

Maa-aseman paikan lisäksi käyttäjän tulee antaa myös käytettävä satelliitti. Kuten maa-aseman paikankin tapauksessa myös satelliitteja on valmiiksi valittavissa pudotusvalikosta muutamia kappaleita. Jos käyttäjä haluaa laskea maa-aseman paikan ominaisuudet satelliittiin, jota ei ole valmiiksi ohjelmoitu työkaluun, käyttäjä voi käyttää 'Manuaalinen'-tilaa, jolloin hänen tulee antaa satelliitin paikka geosynkroonisella radalla. Satelliitin paikka tulee antaa ohjelmalle lukuarvolla välillä  $[-180, 180]$ , jossa negatiiviset luvut ovat koordinaatit asteina läntistä ja positiiviset itäistä pituutta.

Maa-aseman ja satelliitin paikkojen lisäksi on käyttäjän annettava tietoa käytettävästä laitteistosta. Tärkeimpiä annettavia arvoja ovat käytettävä taajuus, maa-aseman antennin vahvistus ja vastaanottimen hyvyysluku ( $G/T$ ) sekä satelliitin lähetysteho ja suuntaamisvaimennus. Maa-aseman ominaisuudet saadaan käytettävän laitteiston tuote-esitteessä. Satelliitin lähetysantennin suuntaamiskuvion sekä lähetysteho saadaan asemapaikalle palvelualuekartoilta.

#### 4.2.2 ITU:n tilastot

Käyttäjän SELC-työkalulle antamien koordinaattien perusteella ohjelma hakee muiden välilehtien tietokannoista tarvittavat ilmastoparametrit, joita tarvitaan vaimennusten laskemiseen. Mikäli ohjelman käyttäjällä on tiedossaan tarkkaa tietoa paikkavaihtoehdon ilmastollisista ominaisuuksista, hän voi myös käyttää niitä valitsemalla pudotusvalikosta 'Manuaalinen'-tilan.

SELC-työkalu käyttää ITU:n tarjoamia tietokantoja, jotka on saatavilla ITU:n sivuilta [28]. Työkaluun syötetyt taulukot ovat  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n isoterminen korkeus, pilvien aiheuttama vaimennus useille eri todennäköisyyksille,  $N_{wet}$ -termin tilastot, vesihöyryn aiheuttama vaimennus eri todennäköisyyksille sekä tilastot  $0.01\text{ }\%$ :n sadeintensiteetin laskuun.

ITU:n tarjoama menetelmä  $0.01\text{ }\%$ :n sadeintensiteetin määrittelyyn perustuu Euroopan keskipitkien sääennusteiden keskuksen (ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 40 vuoden aikana keräämiin tilastoihin maapallon sateista. ITU tarjoaa kolme tiedostoa, joiden avulla sadeintensiteetti lasketaan. Tarjotut tiedostot ovat ESARAIN\_PR6\_v5.TXT, ESARAIN\_MT\_v5.txt ja ESARAIN\_BETA\_v5.TXT. Tilastot on saatavilla  $1.125$  asteen tarkkuudella, joten interpoloinnin avulla saadaan tietylle halutulle paikalle selvitettyä arvot  $P_{r6}$ ,  $M_T$  ja  $\beta$ . Jos halutaan laskea  $0.01\text{ }\%$ :n sadeintensiteetti paikassa, jonka koordinaatit ovat  $Lat$ ,  $Lon$ , lasketaan ensin

$$M_C = \beta M_T \quad (4.1)$$

$$M_S = (1 - \beta) M_T \quad (4.2)$$

joiden avulla voidaan laskea sateen todennäköisyys keskimääräisenä vuotena

$$P_0(Lat, Lon) = P_{r6}(Lat, Lon) \left(1 - e^{-0.0079(M_S(Lat, Lon)/P_{r6}(Lat, Lon))}\right) \quad (4.3)$$

27				
28	Maa-asema 5	Turku	Manuaalinen	Kommentti
29	Maa-aseman nimi	Helsinki		
30	Leveyspiiri (astetta)	Turku		-
31	Pituuspiiri (astetta)	Rovaniemi		-
32	Aseman korkeus (m)	Vaasa		
		Joensuu		
		Manuaalinen	0	
34	Satelliitti	Manuaalinen	Manuaalinen	Kommentti
35	Pituuspiiri	10	10	-
36	Elevaatio asema 1	20,59724398		
37	Elevaatio asema 2	14,14656114		
38	Elevaatio asema 3	17,54467754		
39	Elevaatio asema 4	18,14012357		
40	Elevaatio asema 5	20,69380412		
41				
42	Maa-aseman ominaisuudet		Manuaalinen	Kommentti
43	Maa-aseman taajuuskaista	Manuaalinen		
44	Polarisaatio	V	45	-
45	Antennin halkaisija	2,4	2,4	-
46	Antennin hyötysuhde	0,5	0,5	-
47				
59	DOWNLINK		Manuaalinen	Kommentti
60	Taajuus	11,85		-
61	Vaadittu Eb/N0 (dB)	0		
62	Tiedonsiirtonopeus (Mbps)	1	1	
63	Maa-asema (Vastaanotto)			
64	Vahvistus	47,6		-
65	G/T	27,2		-
66	Kirkkaan taivaan kohinalämpötila (ref)	0		
67	Kirkkaan taivaan kohinalämpötila	0		
68	Asema 1:n kirkkaan taivaan lämpötila	0		
69	Asema 2:n kirkkaan taivaan lämpötila	0		
70	Asema 3:n kirkkaan taivaan lämpötila	0		
71	Asema 4:n kirkkaan taivaan lämpötila	0		
72	Asema 5:n kirkkaan taivaan lämpötila	0		
73	Asema 1:n suuntaamishäviöt	0		
74	Asema 2:n suuntaamishäviöt	0		
75	Asema 3:n suuntaamishäviöt	0		
76	Asema 4:n suuntaamishäviöt	0		
77	Asema 5:n suuntaamishäviöt	0		
78	Satelliitti (Lähetys)			
79	EIRP	51	51	
81	Ilmasto-olosuhteet, Maa-asema 1	ITU:n taulukot	Manuaalinen	Kommentti
82	Lämpötila (K)	ITU:n taulukot		-
83	Sadeintensiteetti R001 (mm/h)	Manuaalinen		-
84	Ilmanpaine (hPa)	29,02507472		-
85	Vesihöyryn tiheys (g/m3)	1013		-
86	N(wet)	4,34		-
87	WVC (1 %) (Integroitu vesimäärä (kg/m2)	29,90911755		-
88	LWC (1 %) (Veden määrä ilmassa)	0,688833333		-
89	0:n Isotermin korkeus	28,47303922		-
90		1,715322833		-
91	Ilmasto-olosuhteet, Maa-asema 2	ITU:n taulukot	Manuaalinen	Kommentti
92	Lämpötila (K)	270	270	-
93	Sadeintensiteetti R001 (mm/h)	21,9259813		-
94	Ilmanpaine (hPa)	1013		-
95	Vesihöyryn tiheys (g/m3)	5	5	-
96	N(wet)	21,18289539		-
97	WVC (1 %) (Integroitu vesimäärä (kg/m2)	0,5		-
98	LWC (1 %) (Veden määrä ilmassa)	26,16316044		-
99	0 C:n Isotermin korkeus	2,115237607		-

Kuva 22: Työkalulle annettavia lähtöarvoja

Mikäli  $P_{r6}$  on nolla, sateen todennäköisyys keskimääräisenä vuotena on nolla, eikä seuraavia laskuja tarvitse enää laskea.

$$R_P(Lat, Lon) = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad [\text{mm/h}] \quad (4.4)$$

missä 0.01% intensiteettiä laskettaessa  $P = 0.01$  muiden arvojen ollessa

$$A = a \cdot b \quad (4.5)$$

$$B = a + c \cdot \ln(P/P_0(Lat, Lon)) \quad (4.6)$$

$$C = \ln(P/P_0(Lat, Lon)) \quad (4.7)$$

ja

$$a = 1.09 \quad (4.8)$$

$$b = \frac{M_C(Lat, Lon) + M_S(Lat, Lon)}{21797P_0} \quad (4.9)$$

$$c = 26.02 \cdot b \quad (4.10)$$

ovat edellä käytettyjä apusuureita. [33]

Koska ilmastotilastot ovat tarjolla ainoastaan 1.125 tai 1.5 asteen tarkkuudella, ohjelma tekee lineaarisen interpolariaation tarkemman arvion laskemiseksi. Ohjelma hakee sille annettujen satelliittimaa-aseman koordinaattien perusteella ilmastotiedon taulukoista mahdollisimman läheltä maa-asemaa. Esimerkiksi, mikäli ohjelman taulukoista hakemat ilmastoarvot vastaisivat taulukon 4 arvoja, aloitetaan interpolointi satelliittimaa-aseman paikalle leveyspiirillä 40.75 ja pituuspiirillä 20.75 laskemalla ensin muutamia aputermejä

Taulukko 4: Lineaarinen Interpolointi

	<b>Leveyspiiri</b>	40	41.5	...
<b>Pituuspiiri</b>				
...	...	...	...	...
20	...	e	f	...
21.5	...	g	h	...
...	...	...	...	...

$$\Delta Lon = \frac{21.5 - 20.75}{1.5}, \quad (4.11)$$

missä 21.5 on tutkittavaa pituuspiiriä seuraava pituuspiiri ITU:n tarjoamasta tilastosta ja 1.5 tilaston tarkkuus. Vastaavasti leveyspiirille

$$\Delta Lat = \frac{41.5 - 40.75}{1.5}. \quad (4.12)$$

Lisäksi on vielä laskettava aputermit

$$b = f - e \quad (4.13)$$

$$c = g - e \quad (4.14)$$

$$d = h - e - g - f \quad (4.15)$$

joiden avulla saadaan ilmastoarvo halutussa pisteessä

$$x = a + b \cdot \Delta Lon + c \cdot \Delta Lat + d \cdot \Delta Lat \cdot \Delta Lon \quad (4.16)$$

#### 4.2.3 Vaimennukset

SELC-työkalu ottaa huomioon vapaan tilan vaimennuksen, ilmakehän kaasuista johtuvan vaimennuksen, pilvistä johtuvan vaimennuksen, sadevaimennuksen sekä troposfäärin skintillaatiosta johtuvan vaimennuksen. Vaimennukset esitetään todennäköisyyden funktiona ja ne lasketaan yhteen kappaleen 3.1.10 esitettyjen yhtälöiden mukaisesti.

Suurimmat erot maa-asemavaihtoehtojen välille syntyvät tavallisesti sadevaimennuksesta sekä satelliitin suuntaamisvaimennuksesta. Satelliitin suuntaamisvaimennukset ohjelman käyttäjä joutuu selvittämään palvelualuekartoista, joita on saatavilla Internetistä. Ionosfäärin ilmiöitä SELC-työkalu ei ota huomioon, sillä ne ovat merkittäviä vain alle 3 GHz:n taajuuksilla.

Sateen ja pilvien aiheuttama vaimennus lisää satelliittilinkkiin kytkeytyvää kohinaa. Lisääntyvä kohina otetaan SELC-työkalussa huomioon vastaanottimen vahvistuskohinalämpötilasuhteessa. ITU on laskenut kirkkaan taivaan kohinalämpötiloja eri elevaatiokulmille ja taajuuksille. Nämä kohinalämpötilat eri elevaatiokulmilla on esitetty kuvassa 19. Kun tiedetään kirkkaan taivaan kohinalämpötila ( $T_{Kirkas\ Taivas}$ ), pilvien ( $A_{pilvet}$ ) ja sateen ( $A_{sade}$ ) aiheuttama kohinalämpötila (kaava 3.72) sekä vastaanottimen vahvistus ( $G$ ) ja hyvyysluku ( $G/T$ ) tietyissä olosuhteissa, voidaan laskea vastaanottimen kohinalämpötila.

$$T = \frac{T_{Kirkas\ Taivas}}{10^{(A_{sade}+A_{pilvet})/10}} + 280 \cdot (1 - 10^{-A_{pilvet}/10}) + 260 \cdot (1 - 10^{-A_{sade}/10}) + (10^{\frac{G-G/T}{10}} - T_{kirkas\ taivas,ref}) \quad [K] \quad (4.17)$$

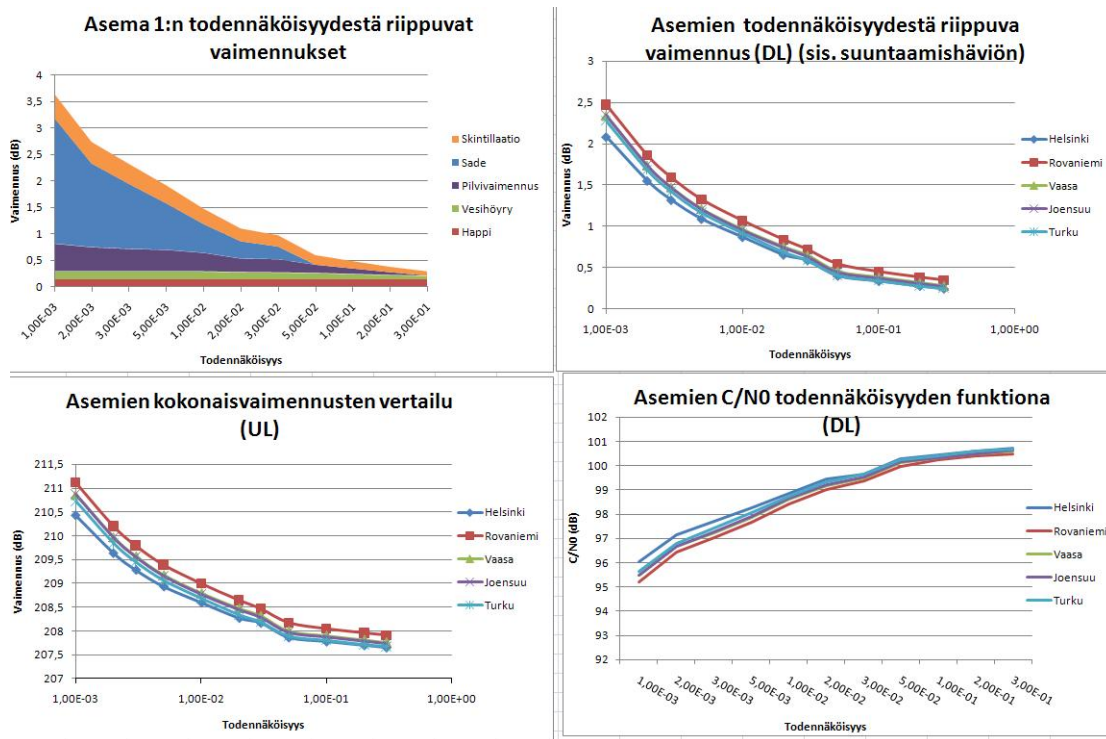
missä  $T_{kirkas\ taivas,ref}$  on kohinalämpötila  $G/T$ :n mittauksen olosuhteissa, mikä usein mainitaan tai voidaan selvittää satelliittiantennin tuote-esitteen tiedoista. Kaavassa 4.17 vaimennusten ja vahvistuksen yksikkö on desibeli ja lämpötilojen Kelvin. Kaava on johdettu CNÉS:n (Centre National d'Études Spatiales, Ranskan avaruusjärjestö) tarjoaman dynaamisen linkkikirjaston käyttämistä kaavoista [34]. Kohinalämpötilan avulla saadaan vastaanottimen hyvyysluku, jota tarvitaan linkkibudjetin laskemiseen.

#### 4.2.4 Kantoaalto-kohinasuhde sekä bittienergia-kohinasuhde

Paras tapa vertailla satelliittimaa-aseman paikan vaihtoehtoja ovat kantoaalto-kohinasuhde tai bittienergia-kohinasuhde. Nämä suhteet ovat sikäli parempia kuin vertailu pelkän kokonaisvaimennuksen vertailu, että näissä suhteissa vaimennuksen lisäksi myös sade- ja pilvien aiheuttama kohina otetaan huomioon.

#### 4.2.5 Ohjelman antamat tulokset

Ohjelma antaa käyttäjälleen tuloksina muun muassa siirtotien kokonaisvaimennuksen, kantoaalto-kohinasuhteen ja bittienergia-kohinasuhteen todennäköisyyden funktiona. Näiden lisäksi SELC-työkalu antaa käyttäjälle pelkän sadevaimennuksen merkityksen linkille sekä erottelun eri vaimennussyiden merkityksestä.



Kuva 23: Ohjelman antamia tuloksia

Ranskan avaruusjärjestö tarjoaa dynaamisen linkikirjaston (DLL, Dynamic Link Library), jolla voi tarkistaa ITU:n mallien mukaiset etenemishäviöt sekä linkkibudjettilaskut. [34] Myös ITU tarjoaa sivuillaan dokumentin [35], jossa on esitetty ITU:n mallien tuloksia tietyillä paikoilla, jolla voi tarkistaa omien laskujensa oikeellisuuden. SELC-työkalun tuloksia on vertailtu näiden työkalujen tuloksiin ja havaittu, että SELC-työkalun tulokset vastaavat muiden työkalujen tuloksia. ITU:n mallien toimivuutta käytännön mittauksiin on tutkittu kappaleessa 5.5.

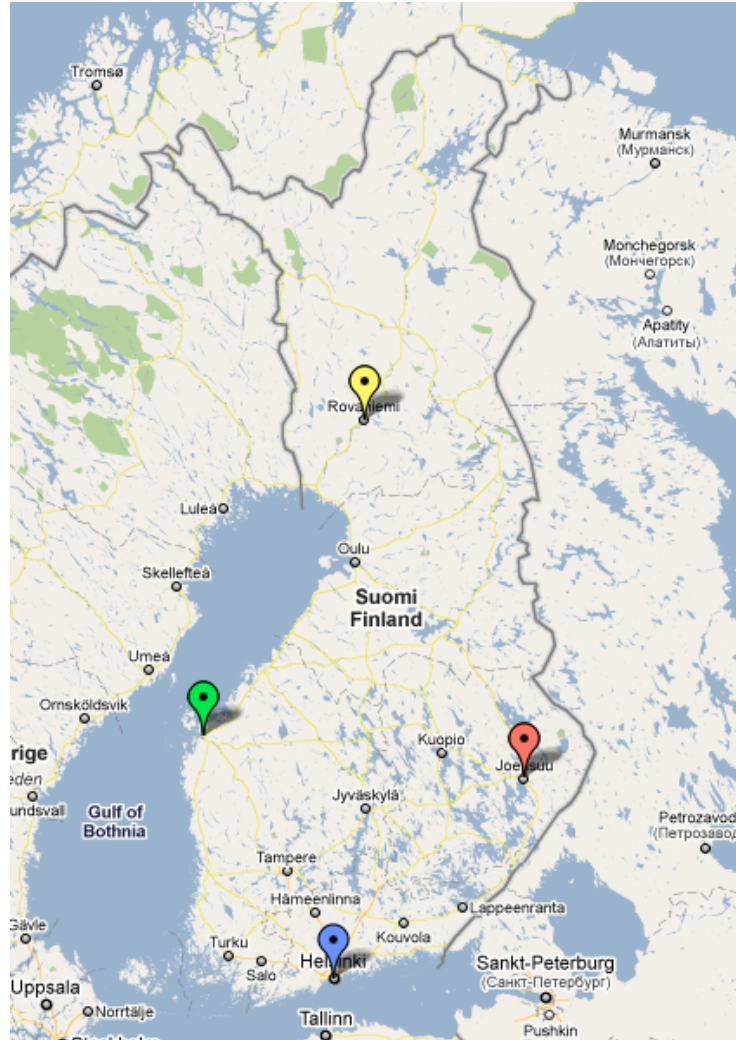
### 4.3 Yhteenveto

Tässä luvussa esiteltiin kriteereitä maa-aseman paikanvalintaan. Tärkeimmät huomioonotettavat asiat ovat yhteystien vaimennukset, interferenssi sekä näköyhteys satelliittiin. Työn yhteydessä tehtiin myös SELC-työkalu, jolla voidaan tutkia ja vertailla paikkakuntien soveltuvuutta satelliittimaa-aseman sijoituspaikaksi. SELC-työkalu käyttää hyväkseen ITU:n tarjoamia ilmastotilastoja, joiden perusteella tehdään kullekin maa-asema sijoituspaikkavaihtoehdolle linkkibudjetti-analyysi. Näiden analyysien perusteella ohjelma esittää kuvaajat muun muassa yhteyden kokonaisvaimennuksesta kantoaaltokohinasuhteesta sekä sadevaimennuksesta todennäköisyyden funktiona.



## 5 Tulokset

Tässä työssä vertaillaan Helsingin, Vaasan, Joensuun sekä Rovaniemen sopivuutta satelliittimaa-aseman sijoituspaikkana. Kuvassa 24 on kuvattu kartalla vertailtavat sijoituspaikat. Sinisellä merkillä on merkattu Helsinki, punaisella Joensuu, vihreällä Vaasa sekä keltaisella Rovaniemi. Paikkojenvalinnassa pyrittiin valitsemaan paikkoja eri puolilta Suomea, jotta päästäisiin näkemään onko eri puolilla Suomea eroavaisuuksia sopivuudessa maa-aseman paikalle. Luvussa 5.5 tutkitaan miten työkalun antamat tulokset sopivat käytännön mittausten tuloksiin.



Kuva 24: Vertailtavat kaupungit

### 5.1 Vertailtavat paikkakunnat ja niiden erityisominaisuudet

Taulukossa 5 on esitetty kaupunkien ilmastollisia lukuarvoja, joita on käytetty työn laskelmissa. Kuvatut ilmastolliset lukuarvot ovat sadeintensiteetti, joka ylittyy 0.01

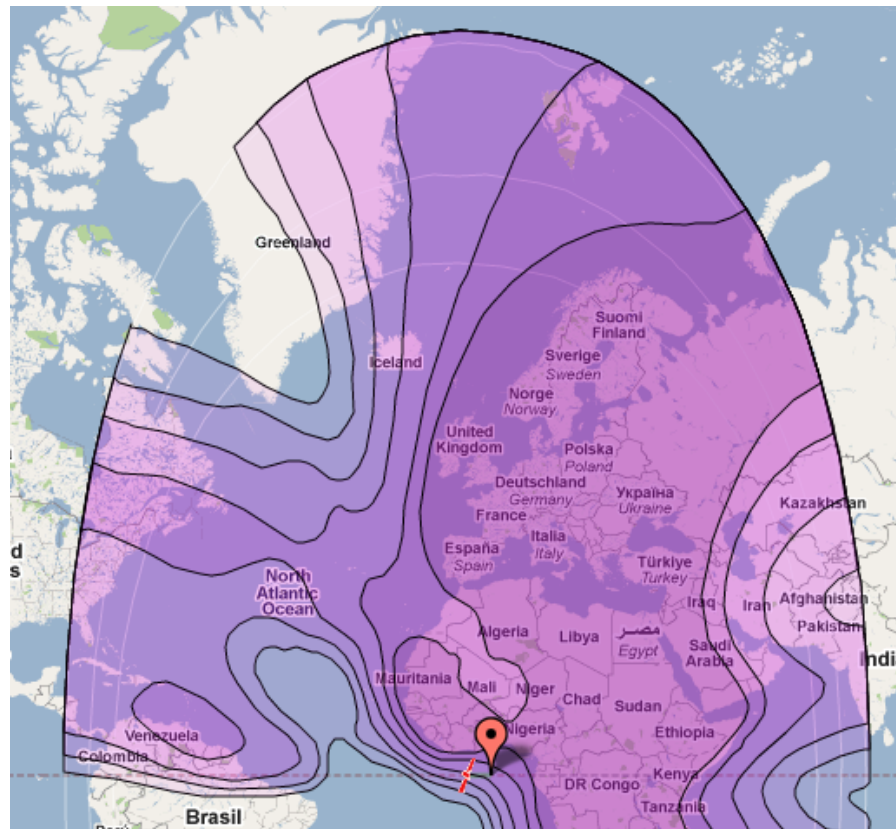
% ajasta,  $0^{\circ}\text{C}$ :n isoterminen korkeus, keskilämpötila, keskimääräinen vesihöyryn tiheys sekä taittumisen kostea termi  $N_{wet}$ .

Taulukko 5: Vertailtavien paikkakuntien tärkeimmät ilmastolliset lukuarvot

Kaupunki	Sateen intensiteetti 0.01 % ajasta [mm/h]	$0^{\circ}\text{C}$ :n isoterminen korkeus [Km]	Lämpötila [K]	Vesihöyryn tiheys [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]	$N_{wet}$
Helsinki	29.03	1.72	277.75	4.34	29.91
Rovaniemi	21.93	2.12	272.30	2.85	21.18
Vaasa	26.81	2.09	276.78	4.05	28.18
Joensuu	28.22	2.06	273.99	3.50	24.99

## 5.2 C-Kaista

C-kaistalla tehtiin laskelmia, joissa laskettiin satelliittilinkin ominaisuudet eri maa-asemavaihtoehdoista Atlantic Bird 3 satelliittiin. Atlantic Bird 3:n paikka geosynkroonisella radalla on  $5^{\circ}$  läntistä pituutta. Kuvassa 25 on esitetty Atlantic Bird 3:n palvelualuekartta.



Kuva 25: Atlantic Bird 3:n palvelualue [36]

Laskelmissa nousevan siirtosuunnan taajuutena käytettiin 6.1375 GHz ja laskevan siirtosuunnan taajuutena 3.9175 GHz. Satelliitin lähetysteho saadaan selvitettyä palvelualuekartasta, josta myös nähdään, että suuntaamishäviöt eivät ole tutkittaville kaupungeille merkittäviä. Satelliittimaa-aseman hyvyysluku oletetaan mitatuksi 10 GHz:n taajuudella 20 asteen elevaatiokulmalla, jolloin kirkkaan taivaan kohinalämpötila on noin 9 Kelviniä. Satelliitin vastaanottimen hyvyysluku saadaan niinkään palvelualuekartoista ja ne saattavat riippua maa-aseman paikasta. Polarisaationa oletettiin käytettävän vertikaalista polarisaatiota. Laskelmissa käytetyt lukuarvot on esitetty taulukossa 6.

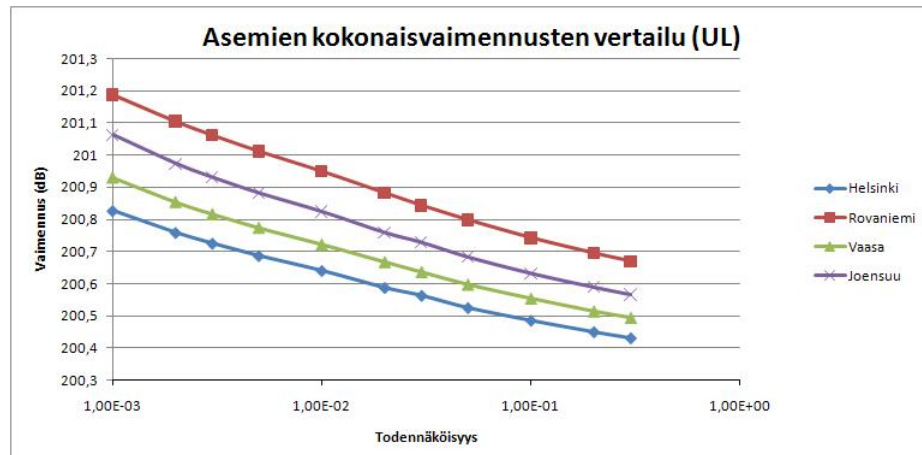
Taulukko 6: C-kaistan laskelmissa käytetyt arvot

<b>Linkin ominaisuudet</b>	
Taajuus (UL)	6.1375 GHz
Taajuus (DL)	3.9125 GHz
Polarisaatio	Vertikaalinen
<b>Satelliitin ominaisuudet</b>	
Käytettävä satelliitti	Atlantic Bird 3
Satelliitin paikka	5 °W
Satelliitin lähetysteho ( <i>EIRP</i> )	39 dBW
Satelliitin vastaanottimen hyvyysluku ( <i>G/T</i> )	-7.5 dB/K
<b>Satelliittimaa-aseman ominaisuudet</b>	
Lähetysteho ( <i>EIRP</i> )	51 dBW
Vastaanottimen vahvistus	38 dB
Vastaanottimen hyvyysluku ( <i>G/T</i> )	18.5 dB/K

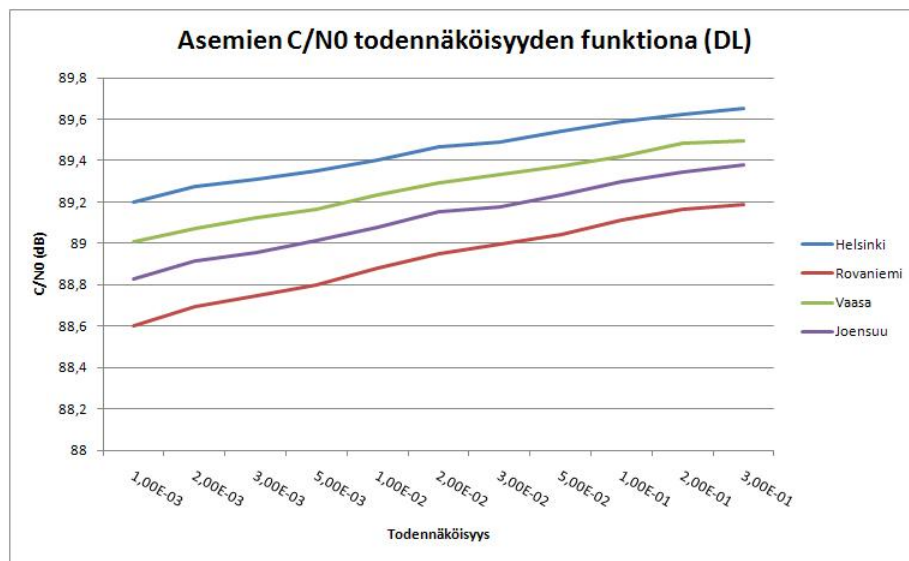
Laskelmien tulokset on esitetty kuvissa 26 ja 27. Tuloksista nähdään, että C-kaistalla erot eivät ole merkittäviä. Sadevaimennus ei ole merkittävä C-kaistalla, mutta sen vaikutus kasvaa suuremmilla taajuuksilla, joilla se on jo dominoiva todennäköisyydestä riippuva vaimenemissyy. Saatujen tulosten perusteella näyttää kuitenkin selvästi siltä, että pienimmillään etenemistien aiheuttama vaimennus on Helsingissä ja suurimmillaan Joensuussa ja Rovaniemellä. Tulokset vaikuttavat järkeviltä, sillä juuri Helsingissä Atlantic Bird 3 näkyy vaihtoehtoista suurimmalla elevaatiokulmalla ja Rovaniemellä pienimmällä kulmalla.

### 5.3 Ku-Kaista

Ku-kaistalla tehtiin vastaavat laskelmat kuin C-kaistallakin. Käytettäväksi keilaksi oletettiin Eutelsatin W3A-satelliitin Europe B-keila, jonka palvelualue on kuvattu kuvassa 28. W3A-satelliitti kiertää maapalloa geosynkroonisella radalla paikalla 7° itäistä pituutta. W3A:n lähetysteho on 51 dBW, mutta nyt palvelualuekartasta nähdään, että satelliitin lähetysantennin suuntaamishäviöt eri paikkakuntien kesken ovat merkittäviä. Helsingille suuntaamishäviöksi saatiin 3 dB, Vaasalle 5 dB, Joensuulle 7 dB ja Rovaniemelle 9 dB. [36]



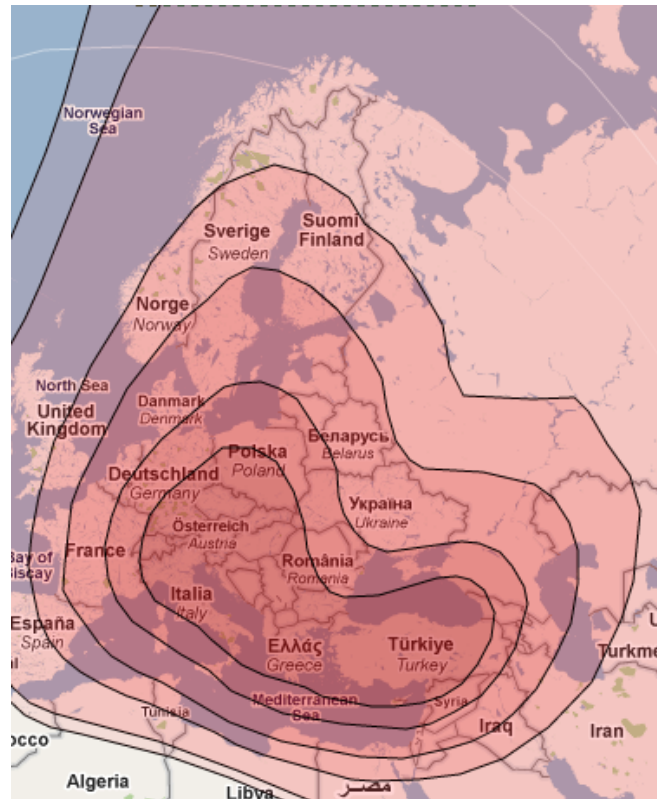
Kuva 26: Nousevan siirtosuunnan kokonaisvaimennus taajuuden funktiona C-kaistalla



Kuva 27: Laskevan siirtosuunnan Kantoaaltokohinasuhde taajuuden funktiona C-kaistalla

Tehdyissä laskuissa nousevan siirtosuunnan taajuutena käytettiin 14.125 GHz ja laskevan siirtosuunnan taajuutena 11.85 GHz. Kuten C-kaistan laskuissakin, myös Ku-kaistan laskut on tehty olettaen, että käytössä on vertikaalinen polarisaatio. Satelliittimaa-aseman vastaanottimen hyvyysluku on oletettu olevan 27,6, joka on mitattu satelliittiyhteydellä kirkkaan taivaan olosuhteissa 20°elevaatiokulmalla ja 10 GHz:n taajuudella. Satelliittilinkin linkkibudjettilaskuissa käytetyt lähtöarvot on esitetty taulukossa 7.

Ku-kaistalla tehtyjen laskujen tulokset on esitetty kuvissa 29-31. Ku-kaistalla ilmakehän vaimennuksien vuoksi kokonaisvaimennus jo selkeämmin osoittaa eroavaisuuksia eri sijoituspaikkavaihtoehtojen välillä. Selvästi suurimmat erot sijoituspaikkavaihtoehtojen välillä tulevat kuitenkin satelliitin lähetysantennin suuntamis-



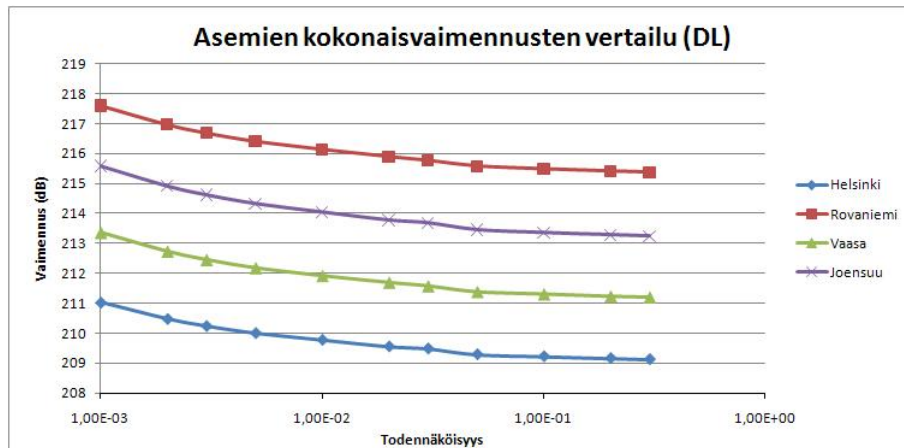
Kuva 28: Eutelsat W3A-satelliitin Europe B-keilan palvelualue [36]

Taulukko 7: Ku-Kaistat:n laskelmissa käytetyt arvot

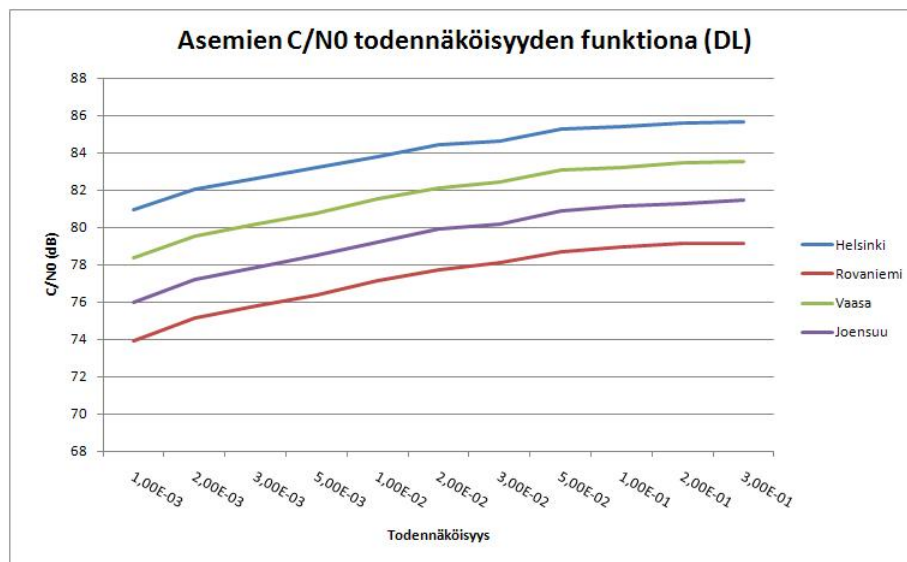
<b>Linkin ominaisuudet</b>	
Taajuus (UL)	14.125 GHz
Taajuus (DL)	11.85 GHz
Polarisaatio	Vertikaalinen
<b>Satelliitin ominaisuudet</b>	
Käytettävä satelliitti	Eutelsat W3A
Satelliitin paikka	7 °E
Satelliitin lähetysteho ( <i>EIRP</i> )	51 dBW
Satelliitin vastaanottimen hyvyysluku ( <i>G/T</i> )	0 dB/K (arvio)
<b>Satelliittimaa-aseman ominaisuudet</b>	
Lähetysteho ( <i>EIRP</i> )	51 dBW
Vastaanottimen vahvistus	47.6 dB
Vastaanottimen hyvyysluku ( <i>G/T</i> )	27.6 dB/K

häviöistä, jotka ovat tässä tapauksessa erittäin isoja. Eteläisin sijoituspaikka eli Helsinki saa myös Ku-kaistalla parhaat tulokset.

Sadevaimennus on esitetty Ku-kaistalla todennäköisyyden funktiona kuvassa 31. Kuvasta nähdään, että sadevaimennus on jo erittäin merkittävä Ku-kaistalla ja tä-



Kuva 29: Laskevan siirtosuunnan kokonaisvaimennus taajuuden funktiona Ku-kaistalla



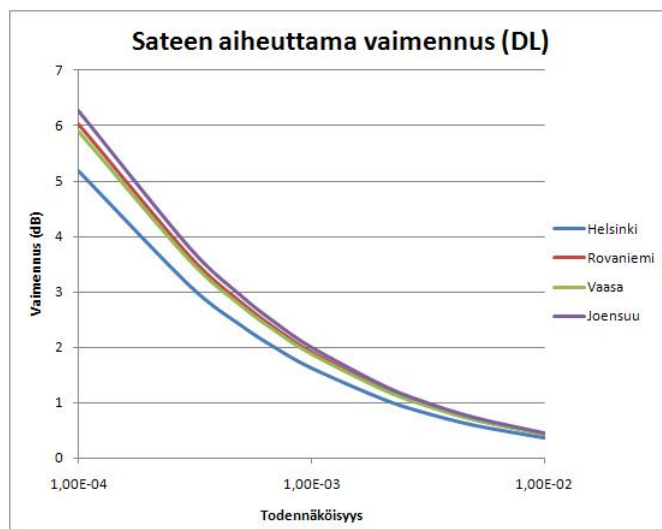
Kuva 30: Laskevan siirtosuunnan Kantoaalto-kohinasuhde taajuuden funktiona Ku-kaistalla

ten tuottaa selviä eroja maa-asemavaihtoehtojen välille. Muihin edellä esitettyihin kuviin verrattuna kuvan 31 X-akseli on skaalattu eri tavalla, mikä on huomattava tuloksia tutkittaessa.

## 5.4 Ka-Kaista

Ka-kaistalla tehtyt laskut tehtiin simuloimalla yhteyttä Astra 1L-satelliittiin. Sen paikka geosynkroonisella radalla on 19° itäistä pituutta. Astra 1L:n Ka-kaistalla toimivan Europe-keilan palvelualue on kuvattu kuvassa 32.

Astra 1L:n Europe-keilan lähetysteho on 51 dBW ja suuntaamishäviöt ovat Helsingille ja Vaasalle 0 dB, Joensuulle 1 dB sekä Rovaniemelle 1.5 dB [36]. Nousevalle



Kuva 31: Sateen aiheuttama vaimennus todennäköisyyden funktiona Ku-Kaistalla



Kuva 32: Astra 1L-satelliitin Europe-keilan palvelualue [36]

siirtosuunnalle käytetty taajuus on 30 GHz ja laskevalle siirtosuunnalle 20.2 GHz. Käytettävä polarisaatio on vertikaalinen kuten edellisilläkin taajuuskaistoilla. Maa-aseman vastaanottimen hyvyysluku on oletettu olevan 28.2 dB/K, joka on oletet-

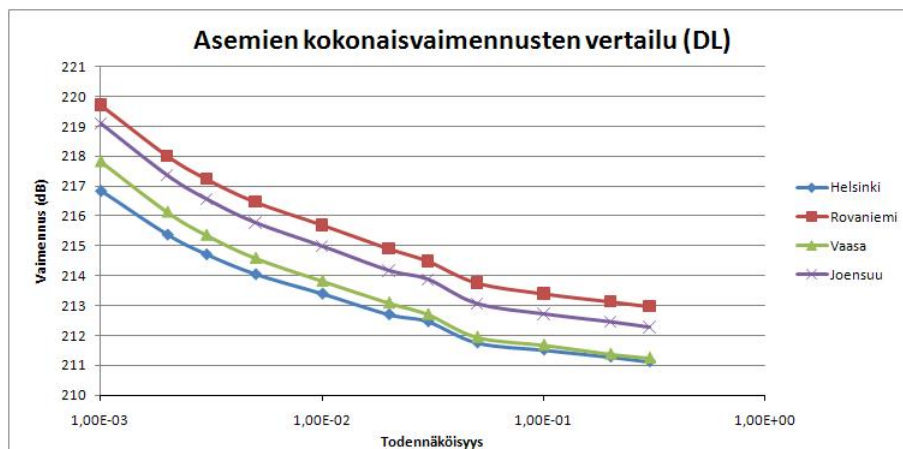


tu saadun mittauksessa 20 asteen elevaatiokulmalla kirkkaan taivaan olosuhteissa. Vastaanottimen vahvistukseksi oletettiin laskuissa 40 dB. Taulukossa 8 on esitetty laskelmissa käytetyt lukuarvot.

Taulukko 8: Ka-Kaistat:n laskelmissa käytetyt arvot

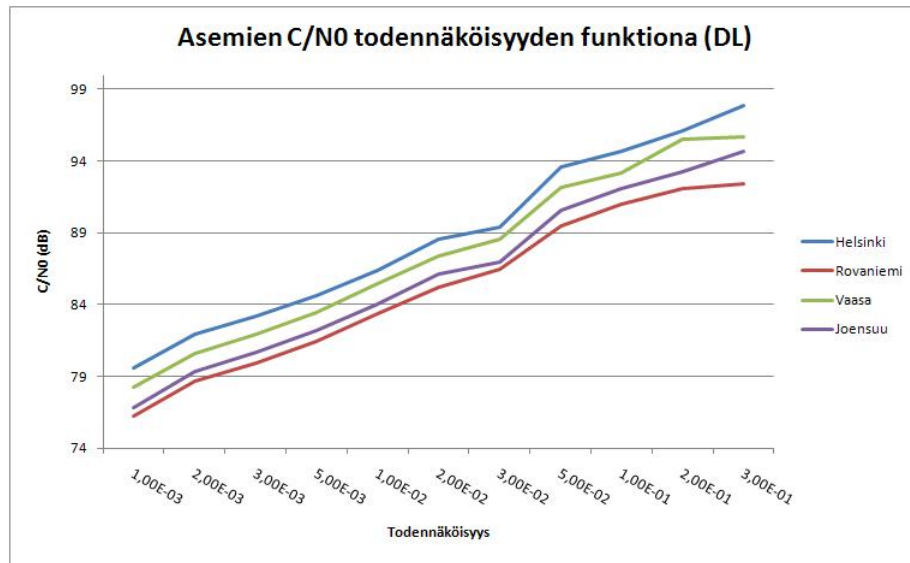
<b>Linkin ominaisuudet</b>	
Taajuus (UL)	30.0 GHz
Taajuus (DL)	20.2 GHz
Polarisaatio	Vertikaalinen
<b>Satelliitin ominaisuudet</b>	
Käytettävä satelliitti	Astra 1L
Satelliitin paikka	19 °E
Satelliitin lähetysteho ( <i>EIRP</i> )	51 dBW
Satelliitin vastaanottimen hyvyysluku ( <i>G/T</i> )	0 dB/K
<b>Satelliittimaa-aseman ominaisuudet</b>	
Lähetysteho ( <i>EIRP</i> )	76 dBW
Vastaanottimen vahvistus	40 dB
Vastaanottimen hyvyysluku ( <i>G/T</i> )	28.7 dB/K

Laskelmissa saadut tulokset on kuvattu kuvissa 33-35. Tuloksista nähdään, että myös Ka-kaistalla parhaat tulokset saadaan Helsingistä. Kokonaisvaimennuksen erotus Rovaniemen ja Helsingin välillä pienimmillä todennäköisyyksillä on noin 3 dB. Suuremman osan ajasta sen sijaan vaimennusten erotus Helsingin ja Rovaniemen välillä on noin 2 dB. Merkittävimmän osa erotuksesta tulee antennin suuntamishäviöistä. Vertailtavista paikkakunnista toiseksi paras satelliittimaa-aseman sijoituspaikaksi on laskelmien perustella Ka-kaistalla Vaasa ja kolmanneksi paras Joensuu.



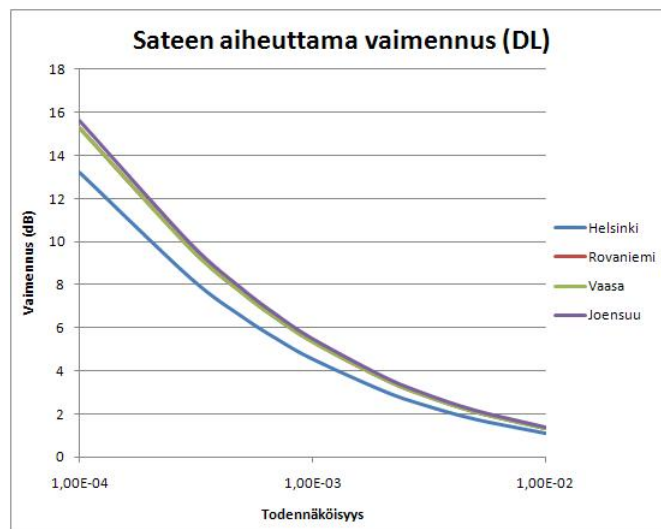
Kuva 33: Laskevan siirtosuunnan kokonaisvaimennus taajuuden funktiona Ka-kaistalla





Kuva 34: Laskevan siirtosuunnan Kantoaalto-kohinasuhde taajuuden funktiona Ka-kaistalla

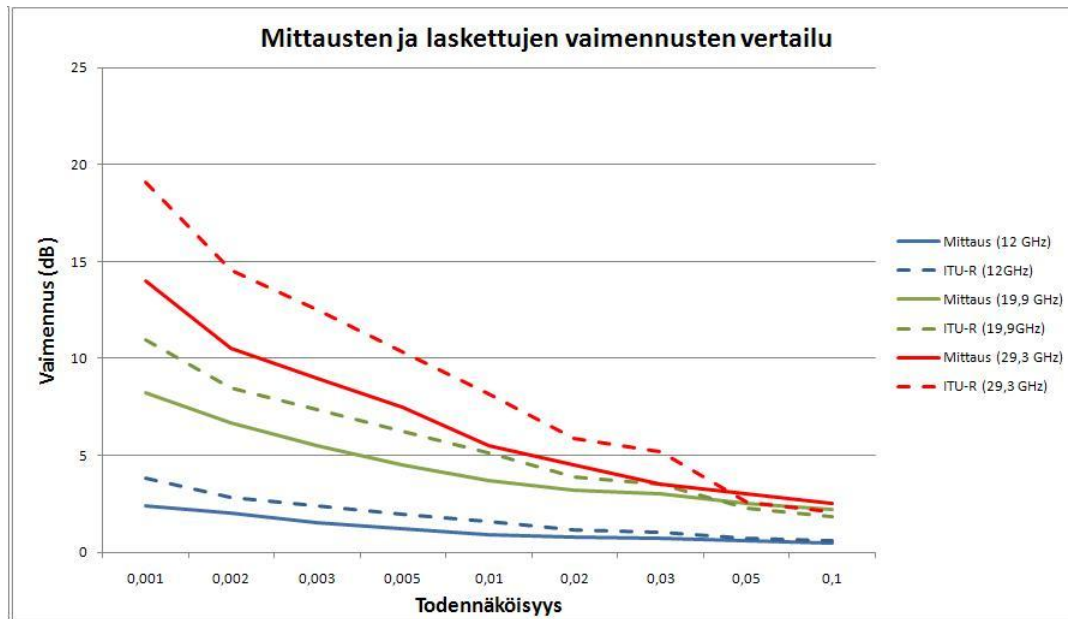
Sateen aiheuttama vaimennus Ka-kaistalla on kuvattu todennäköisyyden funktiona kuvassa 35. Kuvasta nähdään, että Helsingille sateesta johtuva vaimennus on selvästi pienempi kuin muille sijoituspaikkakunnille. Vaikka Rovaniemellä on selkeästi pienempi elevaatiokulma kuin esimerkiksi Joensuulla, samansuuruinen sadevaimennus johtuu Joensuun selvästi suuremmasta sademäärästä.



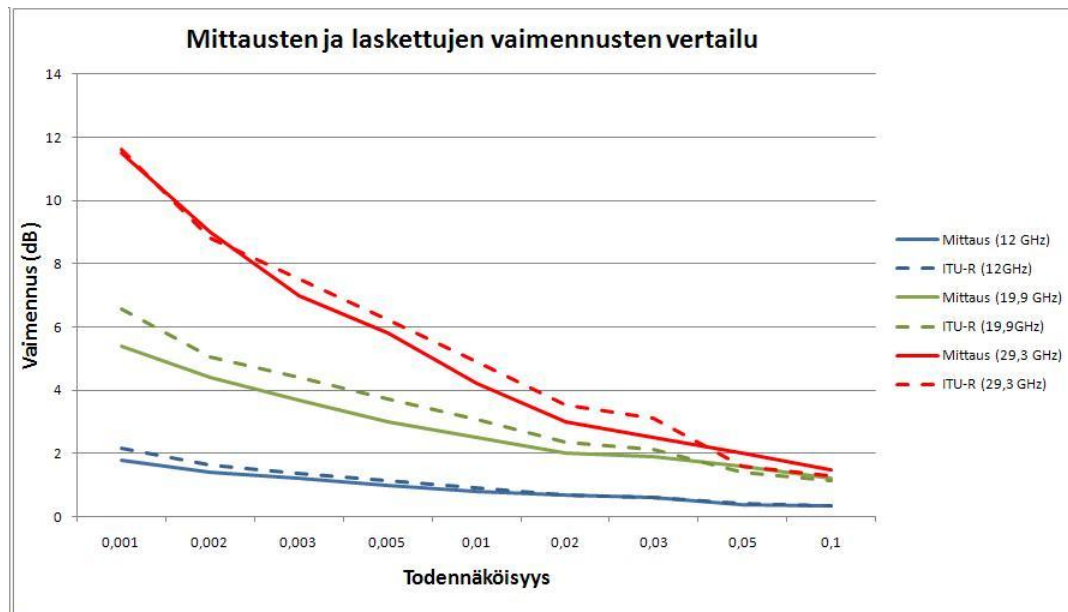
Kuva 35: Sateen aiheuttama vaimennus todennäköisyyden funktiona Ka-Kaistalla

## 5.5 Laskelmien ja tehtyjen mittausten yhteensopivuus

Käytännön suorituskyyvyssä ja suosituksiin perustuvissa laskuissa on aina eroavaisuuksia. Kuvassa 36 on vertailtu mitattuja [37] ja SELC-työkalulla laskettuja tuloksia. Huomataan, että erityisesti suurilla vaimennuksilla lasketut ja mitatut vaimennukset eroavat toisistaan jonkin verran.



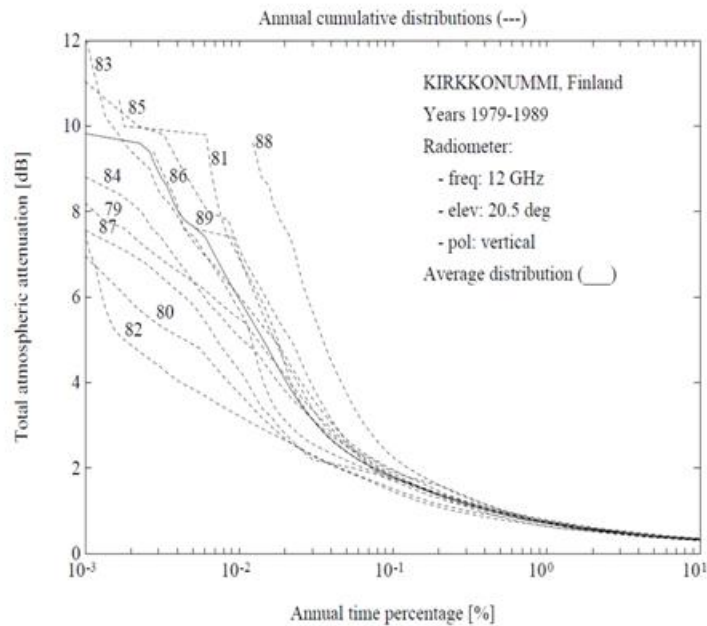
Kuva 36: Satelliittiyhteyden mittausten ja laskelmien yhteensopivuus



Kuva 37: Radiometrimittauksien ja laskelmien yhteensopivuus

Kuvan 36 mittaustulokset on saatu mittaamalla Olympus-satelliitin signaalin

vaimenemista Kirkkonummella 12.5 asteen elevaatiokulmalla aikavälillä 10/1991-9/1992. Kirkkonummella on tehty myös radiometrimittauksia 20.5 asteen elevaatiokulmassa, jotka tehtiin pidemmällä aikavälillä. 12 GHz:n mittaus kesti 10 vuotta ja 20 GHz sekä 29.3 GHz mittaukset kolme vuotta. Niiden mukaiset tulokset sopivat huomattavasti paremmin kehitetyllä työkalulla laskettuihin arvoihin (kuva 37). On kuitenkin muistettava, että radiometrimittaukset ovat jonkin verran satelliittimitoituksia epäluotettavampia suurilla vaimennuksilla. Jo aikaisemmissa tutkimuksissa on todettu, että ITU:n mallit antavat liian suuria arvoja suurilla vaimennuksilla. [4] Vaikka mittauksen ja laskelmien välillä on selkeä ero, virheen suuruus ei todennäköisesti ole merkittävä vertailtaessa paikkakuntia. On kuitenkin mahdollista, että ITU:n mallien mukaisten laskelmien sopivuus kokonaisvaimennuksen laskemiseen heikkenee matalilla elevaatiokulmilla. Tämän lisäksi vuosittaiset vaimennuksen vaihtelut saattavat olla erittäin suuria kuten nähdään kuvasta 38.



Kuva 38: Ilmakehänvaimennusten vuosittainen vaihtelu 1979-1989 [4]

## 5.6 Yhteenveto

Tässä luvussa vertailtiin Helsingin, Vaasan, Joensuun sekä Rovaniemen soveltuvuutta satelliittimaa-aseman paikaksi. Vertailu tehtiin työn yhteydessä kehitetyn SELC-työkalun avulla. Paikkakuntien soveltuvuutta maa-aseman paikaksi tutkittiin erikseen C-, Ku- ja Ka-kaistoilla.

C-kaistalla tutkittiin yhteyttä paikkakunnilta Atlantic Bird 3 -satelliittiin. C-kaistalla ilmakehän vaimennukset ovat melko vähäisiä, eikä paikkakuntien välillä todettu olevan kovinkaan suuria eroja. Ku-kaistalla simuloitiin yhteyttä vertailtavien paikkakuntien ja Eutelsat W3A -satelliitin välillä. Kyseisen satelliitin Europe

B-keilalla antennin suuntaamishäviöt ovat tässä tapauksessa merkittäviä, ja ne selittävät suuren osan paikkakuntien välisistä eroista. Ku-kaistalla kuitenkin myös ilmakehän vaimennuksien merkitys alkaa kasvaa. Merkittävin näistä ilmakehän vaimennuksista on sadevaimennus. Laskelmien tulosten perusteella yhteystien vaimennus on pienin Helsingissä ja suurin Rovaniemellä. Ilmakehän vaimennuksia voidaan kuitenkin kompensoida suuremmalla antennilla. Ka-kaistalla tutkittiin paikkakuntien soveltuvuutta yhteydessä Astra 1L-satelliittiin. Ku-kaistaan verrattuna Ka-kaistalla ilmakehän vaimennukset kasvavat entisestään. Myös Ka-kaistalla tehdyissä laskelmissa antennin suuntaamishäviöt olivat merkittäviä.

Luvussa vertailtiin myös aiemmin tehtyjen mittausten ja SELC-työkalun tulosten yhteensopivuutta. Tulokset vastaavat melko hyvin toisiaan. Suurimmat eroavaisuudet ovat satelliittiyhteyksissä, joissa käytetään matalaa elevaatiokulmaa ja korkeaa taajuutta. Mittausten tuloksia vertailtaessa on huomioitava, että vuosittaiset vaihtelut vaimennuksessa saattavat olla erittäin suuria, joten malleja pitää vertailla useampia vuosia kestäneiden mittausten tuloksiin.

## 6 Johtopäätökset

Tässä työssä on luotu katsaus satelliittitietoliikenteen perusteisiin ja tutkittu eri sijoituspaikkojen eroja satelliittimaa-asemalle.

Tietoliikennesatelliitit kiertävät maata noin 200-36000 km korkeudella maanpinnasta. Tässä työssä keskityttiin geosynkroonisella radalla kiertäviin satelliitteihin. Geosynkroonisella radalla olevat satelliitit ovat noin 36000 km etäisyydeltä maasta. Tällä radalla maata kiertävien satelliittien etuja ovat, että ne pysyvät maasta katsottuna paikoillaan sekä niillä saavutetaan erittäin suuri palvelualue.

Pitkät etenemisviiveet tuottavat ongelmia tietoverkkoihin. Satelliittitietoliikenteessä signaalin kulkema matka on niin pitkä, että viiveet tuottavat linkeille ongelmia. TCP-protokolla on alunperin kehitetty maanpäällisiin verkkoihin, joissa etenemisviiveet ovat pieniä. Näin ollen TCP-protokollan suorituskyky satelliittilinkeissä on heikohko eikä koko linkin parasta mahdollista suorituskykyä saada käyttöön. Satelliittijärjestelmille on kuitenkin kehitetty erilaisia kiihdytysmenetelmiä, joiden avulla TCP-yhteyksien suorituskykyä saadaan parannettua. Myös virheekorjauskoodausmenetelmät ovat satelliittilinkeissä suosittuja suorituskykyä parantavia menetelmiä. Koodauksessa ideana on lisätä signaaliin ylimääräisiä bittejä, joiden avulla tiedonsiirrossa tapahtuvat virheet voidaan havaita ja korjata.

Suurin vaimennusta aiheuttava tekijä satelliittilinkeissä on vapaan tilan vaimennus. Lisäksi ilmakehän aiheuttamat vaimennukset heikentävät signaalia. Merkittävimmät maan ilmakehässä signaalia vaimentavat tekijät ovat sade, pilvet sekä ilmakehän kaasut. Vaimennusten lisäksi satelliittiyhteyden suunnittelijan on otettava huomioon kohina ja interferenssi. Interferenssiä syntyy muista radioyhteyksistä, satelliittiyhteyksiin tavallisesti muista satelliittilinkeistä. Erittäin matalilla korotuskulmilla myös maanpäälliset radiolaitteet voivat häiritä radioyhteyttä. Suurin kohinalähde satelliittilinkissä on maapallo. Matalilla elevaatiokulmilla maapallon aiheuttama kohina häiritsee yhteyttä enemmän kuin suurilla korotuskulmilla. Aurinko on maan ulkopuolisista kohinalähteistä merkittävin. Auringon aiheuttama kohina häiritsee kuitenkin yhteyttä vain noin 20 minuuttia päivässä kevät- ja syyspäivätasausten aikoihin. Lisäksi sade- ja pilvivaimennus lisäävät signaalin kohinaa.

Linkkibudjettianalyysillä voidaan suunnitella satelliittiyhteyksiä. Linkkibudjetissa yhteyden lähetysteho ja vahvistukset summataan ja niistä vähennetään vaimennukset. Tulokseksi saadaan yhteyden kantoaaltokohinasuhde. Linkkibudjettianalyysissä otetaan huomioon myös yhteyden kohina. Satelliittilinkin suunnittelussa hyväksytään tavallisesti se, että yhteys saattaa olla poikki lyhyitä aikoja, joten linkin suunnittelussa on usein lähtökohtana, että linkki toimii 99,99 % ajasta.

Tärkein syy erojen muodostumiseen eri sijoituspaikkojen välillä on pienemmät satelliittien lähetysantennien suuntaamisvaimennukset, jotka saattavat olla erittäin merkittäviä yhteyden laatuun vaikuttavia tekijöitä. Toiseksi, ilmakehän vaimennukset ovat pienempiä eteläisillä satelliittimaa-asemilla, sillä niillä pystytään käyttämään suurempaa korotuskulmaa kuin pohjoisilla asemilla, ja tällöin signaalin ilmakehässä etenemä matka lyhenee. Helsingistä usein minimielevaatiokulmana pidettynä yli 10 asteen kulmissa nähdään kaikki satelliitit välillä 25W-75E, kun taas esimerkiksi Rovaniemeltä näkyviin saadaan satelliitit geosynkrooniselta radalta 10 asteesta

läntistä pituutta 62 asteeseen itäistä pituutta. Matalammilla elevaatiokulmilla myös radiosäteen kaartumisen, kohinan ja interferenssin kasvu heikentävät yhteyden laatua.

Työn yhteydessä kehitettiin SELC-työkalu, jonka avulla voidaan vertailla eri paikkakuntien soveltuvuutta satelliittimaa-aseman sijoituspaikaksi. Työkalulla vertailtiin Helsingin, Vaasan, Joensuun ja Rovaniemen sopivuutta sijoituspaikaksi. Tehtyjen laskelmien perusteella C-Kaistalla erot sijoituspaikkakuntien välillä eivät ole vielä suuria. Ku-Kaistalla ero ilmakehän erot sijoituspaikkojen välillä olivat jo merkittäviä. Suurin osa eroista selittyy mittauksessa käytetyn satelliitin suuntaamishäviöstä, mutta myös muut vaimennukset heikentävät pohjoisemmasta Suomesta saatavan satelliittiyhteyden laatua. Ka-kaistalla ilmakehän vaimennukset kasvavat entisestään, mikä parantaa eteläisten sijoituspaikkojen sopivuutta satelliittimaa-aseman paikaksi pohjoisempiin sijoituspaikkoihin verrattuna. Laskelmien perusteella Vaasa sopii Joensuuta paremmin maa-aseman sijoituspaikaksi. Syy Vaasan parempiin tuloksiin on pienempi sadeintensiteetti.

Vaikka työn perusteella havaitut erot saattavat vaikuttaa pieniltä, voi 0.5 dB vaimennuksen kasvu lisätä bittivirhesuhdetta  $10^{-8}$ :sta  $10^{-6}$ :een. Bittivirhesuhteen kasvun vuoksi voidaan joutua siirtymään käyttämään yksinkertaisempaa modulaatiota eli käytännössä pienempää tiedonsiirtonopeutta. Antennin kokoa kasvattamalla voidaan kuitenkin kompensoida suurempia ilmakehän etenemishäviöitä.

Kansainvälisen televiestintäliiton tarjoamat mallit eivät anna aiemmin tehtyjen mittausten perusteella tarkkoja tuloksia. Erityisesti ITU:n mallin antamat tulokset matalilla elevaatiokulmilla eroavat mitatuista vaimennuksista. Matalille elevaatiokulmille olisikin etsittävä malleja, jotka vastaavat paremmin tehtyjen mittausten mukaisia arvoja. Olisi tärkeää, että satelliittilinkkien suunnittelussa päästäisiin kaikissa olosuhteissa tarkkoihin tuloksiin, jotta taajuuskaistat pystyttäisiin hyödyntämään mahdollisimman tehokkaasti.

## Viitteet

- [1] Karttunen, H. Matkalla avaruuteen. Otava, Helsinki. 2009. 336 ss. ISBN 978-951-1-23174-5.
- [2] Lindell, I. Sähkön pitkä historia. Otatieto, Helsinki. 2009. 454 ss. ISBN 978-951-672-358-0.
- [3] Ippolito, L. Satellite communications Systems Engineering: Atmospheric effects, Satellite Link Design and System Performance. John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, Yhdistynyt Kuningaskunta. 2008. 376 ss. ISBN 978-0-470-72527-6.
- [4] Tervonen, J. Satelliittitietoliikenteen radioaaltojen etenemisosuuden opetusmoniste. Teknillinen Korkeakoulu, Espoo.
- [5] Sooyoung, K. & Sastri, K. ITU-R standardization of fixed satellite services (FSS). Teoksessa Satellite and Space Communications, 2007. IWSSC '07. International Workshop on. Salzburg. September 2007, ss. 247–252. doi:10.1109/IWSSC.2007.4409425. ISBN 978-1-4244-0938-9.
- [6] ITU-R:n internetsivut. <http://www.itu.int/ITU-R/information/promotion/e-flash/03-2008/ITU-regions.jpg> (viitattu: 2.9.2010).
- [7] Elbert, B. Introduction to Satellite Communication. Artech House, Boston, Yhdysvallat, 3. painos. 2008. 447 ss. ISBN 9781596932104 (elektroninen aineisto).
- [8] Inglis, A. F. & Luther, A. C. Satellite Technology - An Introduction. Elsevier, Boston, Yhdysvallat, 2. painos. 1997. 134 ss. ISBN 978-0-080-52416-0 (elektroninen aineisto).
- [9] Roddy, D. Satellite Communications. McGraw-Hill Professional Publishing, New York, Yhdysvallat. 2006. 650 ss. ISBN 0071486895 (elektroninen aineisto).
- [10] Kota, S. & Marchese, M. Quality of service for satellite IP networks: a survey. International Journal of Satellite Communications and Networking, 21(4-5). 2003:303–349. doi:10.1002/sat.765.
- [11] Barsocchi, P., Celandroni, N., Davoli, F. et al. Radio resource management across multiple protocol layers in satellite networks: A tutorial overview. International Journal of Satellite Communications and Networking, 23. 2005:265–305. doi:10.1002/sat.820.
- [12] Berrou, C., Glavieux, A. & Thitimajshima, P. Near shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes. Teoksessa IEEE International Conference on Communications. 1993, osa 2, ss. 1064–1070. doi:10.1109/ICC.1993.397441. ISBN 0-7803-0950-2.

- [13] Moreira, J. & Farrell, P. Essentials of error-control coding. John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, Yhdistynyt Kuningaskunta. 2006. 361 ss. ISBN 9786610606153 (elektroninen aineisto).
- [14] Akyildiz, I. Broadband satellite networks for last mile technology. 2008. (julkaisematton) (Saatavilla: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.131.316>, viitattu 2.9.2010).
- [15] Hu, Y. & Li, V. Satellite-based internet: A tutorial. IEEE Communication Magazine, 39(3). 2001:154–162. doi:10.1109/35.910603.
- [16] Doffoh, J., Mereish, R. & Puckett, M. Analysis and comparisons of acceleration protocols for TCP over satellite. Teoksessa MILCOM 2005. Atlantic City, Yhdysvallat. 2005, osa 1, ss. 279–285. doi:10.1109/MILCOM.2005.1605698. ISBN 0-7803-9393-7.
- [17] Muhonen, J. & Durst, R. Performance of transport protocols over satellite communication links. Teoksessa Military Communications Conference. Boston, Yhdysvallat. 1998, osa 1, ss. 263–269. doi:10.1109/MILCOM.1998.722583. ISBN 0-7803-4506-1.
- [18] Intelsat. Yrityksen internetsivut, <http://www.intelsat.com/>. (viitattu 2.9.2010).
- [19] Eutelsat. Yrityksen internetsivut, <http://www.eutelsat.com/>. (viitattu 2.9.2010).
- [20] SES. Yrityksen internetsivut, <http://www.ses.com>. (viitattu 2.9.2010).
- [21] RECOMMENDATION ITU-R P.525-2, Calculation of free-space attenuation. 1994.
- [22] RECOMMENDATION ITU-R P.839-3, Rain height model for prediction methods. 2001.
- [23] RECOMMENDATION ITU-R P.838-3, Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. 2005.
- [24] RECOMMENDATION ITU-R P.618-10, Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Earth-Space Telecommunication Systems. 2009.
- [25] RECOMMENDATION ITU-R P.676-8, Attenuation by atmospheric gases. 2009.
- [26] RECOMMENDATION ITU-R P.840-4, Attenuation due to clouds and fog. 2009.
- [27] RECOMMENDATION ITU-R P.531-10, Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems. 2009.



- [28] ITU-R:n Tutkimusryhmä 3:n Internetsivu. <http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=study-groups&rlink=rsg3-software-ionospheric&lang=en>. (viitattu 2.9.2010).
- [29] Sun outage calculator, <http://www.satellite-calculations.com/SUNcalc/SUNcalc.htm>. 2008. (viitattu 2.9.2010).
- [30] Mohamadi, F. & Lyon, D. Effects of solar transit in Ku-band VSAT systems. *IEEE Transactions on Communications*, 36(7). July 1988:892–894. doi:10.1109/26.2821.
- [31] RECOMMENDATION ITU-R P.372-10, Radio noise. 2009.
- [32] Castanet, L., Bolea-Alamanac, A. & Bousquet, M. Interference and fade mitigation techniques for Ka and Q/V band satellite communication systems. Teoksessa COST 272-280 International Workshop on Satellite Communications from Fade Mitigation to Service Provision. Noordwijk, Alankomaat. toukokuu 2003.
- [33] RECOMMENDATION ITU-R P.837-5 Characteristics of precipitation for propagation modelling. 2007.
- [34] Centre National d'Études Spatiales. ITU-R propagation models software library. (Saatavilla: <http://logiciels.cnes.fr/PROPA/en/logiciel.htm>, viitattu 2.9.2010).
- [35] ITU-R. Validation examples for study group 3 earth-space propagation prediction methods. (Saatavilla: <http://www.itu.int/oth/R0A04000002/en>, viitattu 2.9.2010).
- [36] Satbeams. Satellite coverage maps. <http://www.satbeams.com/footprints>. (viitattu 2.9.2010).
- [37] Karhu, S. Studies of Rain Attenuation and Total Atmospheric Attenuation for Low-Availability Satellite Communications. Väitöskirja, Helsingin Teknillinen Korkeakoulu, sähkötekniikan osasto, Espoo. 1995.